

高温后花岗岩三轴压缩条件下力学特性试验研究

朱振南^{1,2,3}, 梁缘^{1,2}, 解经宇^{*4,5}, 乔伟^{4,5}, 杨圣奇^{1,2}, 杨现禹³, 黄彦华^{1,2}, 张雨^{1,2}, 范浩⁶, 田红³, 蒋国盛³, 陈劲³

(1. 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; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国地质大学(武汉) 教育部岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074; 4. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 5. 中国矿业大学 矿区深部零碳负碳技术教育部工程研究中心, 徐州 221116; 6. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽淮南 232001)

摘要: 随着高温岩体工程的进一步发展, 需要准确揭示高温和高压条件对储层岩石物理力学变化影响机理, 来分析高温岩体工程储层稳定性, 提高资源开采效率。基于此, 通过对高温后(20~600 °C)的花岗岩进行不同围压作用下的常规三轴压缩试验, 分析了不同围压下高温后花岗岩试样常规三轴压缩全应力-应变关系, 探讨了温度、围压对花岗岩的强度和变形特征及破坏形式的影响, 同时结合高温后花岗岩偏光显微镜图像, 从细观上揭示了高温后花岗岩力学特征变化的机制。研究结果表明: (1) 高温后花岗岩三轴抗压强度和弹性模量皆随温度的升高而逐渐降低, 随围压的升高而增大。与常温条件下相比, 600 °C时单轴抗压强度和弹性模量分别降低了56.47%和54.63%, 而60 MPa条件下, 三轴抗压强度和弹性模量仅降低了41.04%和33.51%。高温对花岗岩体积应变的膨胀有很大影响, 温度越高, 试样体积膨胀的越明显, 且高温后花岗岩粘聚力和内摩擦角皆随温度的升高而降低; (2) 温度大于400 °C时, 花岗岩强度和变形参数降低幅度呈现突然增大的趋势, 且微裂纹的密度和平均宽度总体上也有突然增大的趋势, 单轴压缩条件下破坏形态也由轴向劈裂破坏向剪切破坏过渡, 花岗岩强度和变形参数及破坏形式变化的阈值温度应大于400 °C; (3) 裂纹面积(ϕ)和平均裂纹宽度(W_a)皆随温度的升高而逐渐增大, 400 °C时, ϕ 和 W_a 增加到1.52%和7.30 μm , 随着温度升高到600 °C时, ϕ 和 W_a 进一步升高到3.67%和11.00 μm , 与力学与变形参数随温度逐渐减小的趋势相对应, 岩石内部水分子逸出、矿物晶体膨胀系数的差异及矿物晶体物理变化导致花岗岩试样内部晶间和晶内微裂纹逐渐萌生、扩展和交汇成裂纹网络, 导致高温后花岗岩力学特性的变化。通过宏观和细观试验结果相结合揭示了高温和高压条件下储层花岗岩物理力学变化机理, 为涉及高温岩体工程开发的相关计算与数值模拟提供理论支撑。

关键词: 高温花岗岩; 三轴压缩; 力学特性; 偏光显微镜; 矿物晶体膨胀

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号:

作者简介: 朱振南(1992—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高温岩石力学等方面的研究工作。E-mail: zhennanzhu0142@163.com。

Experimental investigation on mechanical behavior of granite specimens after thermal treatment under conventional triaxial compression

ZHU Zhennan^{1,2,3}, LIANG Yuan^{1,2}, XIE Jingyu^{*4,5}, QIAO Wei^{4,5}, YANG Shengqi^{1,2}, YANG Xianyu³, HUANG Yanhua^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, FAN Hao⁶, TIAN Hong³, JIANG Guosheng³, CHEN Jin³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, China

University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074; 4. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 5. Engineering Research Center of Zero-carbon and Negative-carbon Technology in Depth of Mining Areas, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116; 6. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: With the further development of high-temperature rock engineering, it is necessary to accurately reveal the influence of high temperature and high pressure on the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42207178, 42472334, 42102353); 江苏省国际科技合作计划-重点国别产业技术研发合作项目(BZ2024023); 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放基金课题(202313); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20231080); 中国科协青年人才托举工程项目(2023QNRC001))

收稿日期: 2024-05-07

*通信作者(E-mail: xiejingyu@cumt.edu.cn)

changing mechanisms of physical and mechanical properties of reservoir rocks to analyze the stability of high-temperature rock engineering reservoirs and improve resource extraction efficiency. Based on the conventional triaxial compression tests of granite after high temperature ranging from 20 to 600 °C under different confining pressures, complete stress-strain curves of granite under conventional triaxial compression were analyzed and the influence of temperature and pressure on the deformation and strength characteristic and failure mode was discussed. Meanwhile, their changing mechanisms of mechanical properties of granite after exposure to various temperatures were revealed through optical microscopy observations. The test results show that: (1) The triaxial compressive strength and elastic modulus of granite after high temperature gradually decrease with temperature, and increase with confining pressure. Compared with room temperature, the uniaxial compressive strength and elastic modulus at 600 °C decreased by 56.47% and 54.63%, respectively, while under 60 MPa conditions, the triaxial compressive strength and elastic modulus only decreased by 41.04% and 33.51%, respectively. Temperature has a significant effect on the expansion of volumetric strain, and the higher the temperature, the more obvious the volume expansion of the specimens. The cohesion and internal friction angle of granite after high temperature both decrease with temperature; (2) When the temperature is higher than 400 °C, the changes in strength and deformation parameters of granite greatly increases, and the density and average width of microcracks also present a sudden-increase trend overall. Meanwhile, the failure mode of the specimens under uniaxial compression conditions changes from axial splitting failure to shear failure. The threshold temperature for the strength and deformation parameters and failure mode of granite is higher than 400 °C; (3) The microcrack area (ϕ_s) and average microcrack width (W_a) both gradually increase with temperature. At 400 °C, ϕ_s and W_a increase to 1.52% and 7.30 μm . As the temperature further rises to 600 °C, ϕ_s and W_a reach 3.67% and 11.00 μm , respectively, corresponding to the decreasing trend of mechanical and deformation parameters with temperature. It was found that the escape of water molecules inside rock bodies, differences in mineral crystal expansion coefficients and mineral chemical changes lead to the initiation, propagation and interaction of microcracks among and within crystals in the granite, which ultimately induces the changes in the mechanical properties of the granite. The combination of macroscopic and microscopic experimental results reveals the physical and mechanical changes in reservoir granite under high-temperature and high-pressure conditions, which provides a theoretical basis for the design calculations and numerical simulations of high-temperature rock engineering projects.

Key words: Heat-treated granite; Triaxial compression; Mechanical properties; Polarization microscope; Mineral crystal expansion

0 引言

随着工业化进程的深入, 我国对能源的需求日益增加, 矿产资源深度开采、地热资源开发、高放核废料地下深埋处置和 CO₂ 地质封存固化等^[1-2]高温岩体工程将会得到进一步发展, 高温下或高温后岩石物理力学变形机制的相关研究也将受到越来越多的关注。在过去几十年间, 国内外许多学者针对不同的高温岩体工程, 对不同类型的岩石进行了相应的高温物理力学试验^[3-21], 这些试验结果揭示了温度对岩石的物理力学行为有重大的影响。

在物理性质方面, 吴星辉等^[3]得出高温处理后花岗岩的密度随温度呈降低的趋势, 且在 400 °C后降幅迅速增大, 同时花岗岩纵波波速随温度的升高而降低。秦严等^[4]通过试验得出高温后闪长岩的块体密度和纵波波速呈现出类似的趋势。V. Srinivasan 等^[5]进一步指出遇水冷却条件下高温后花岗岩纵波波速降低幅度大于自然冷却条件下纵波波速降低幅度。A. M. Ferrero 等^[6]发现高温后大理岩的块体密度随温度的升高而近

线性降低。P. Jia 等^[7]分析了不同粒径花岗岩孔隙度随温度变化的特征, 总结得出: 两种花岗岩的孔隙度随温度不断增大, 当加热温度超过 400 °C时, 两者孔隙度迅速增加, 且粗粒花岗岩孔隙度变化更明显。Y. Xi 等^[8]结合核磁共振方法进一步研究了三种冷却方式下花岗岩孔隙特征演化和损伤劣化特征, 提出随着热处理温度的升高, 三种冷却速率下花岗岩的孔隙率先缓慢后迅速增加, 损伤值随着热处理温度的升高而不断增加, 液氮 (LN₂) 冷却的损伤值最高, 其次是水和自然冷却下的损伤值。高温后沉积岩如砂岩^[9]、页岩^[10]、黏土岩^[11]等孔隙度和渗透率也均随温度的升高整体上呈增大的趋势。

在力学性质方面, 许锡昌和刘泉声^[12]分别对高温后单轴压缩试验的花岗岩和煤层砂岩变形强度进行了研究, 得到花岗岩和煤层砂岩单轴抗压强度、弹性模量随温度的升高而降低, 峰值应变逐渐升高。Y. C. Wu 等^[13]对比分析了不同冷却速率下花岗岩抗拉强度, 发现遇水冷却下花岗岩的抗拉强度低于自然冷却下花岗

岩的抗拉强度。R. H. Cao 等^[14]采用短棒压缩 (Short core compression, SCC) 法进一步对循环遇水冷却处理后的花岗岩试样进行了剪切断裂力学试验, 结果表明: 循环遇水冷却作用导致断裂韧性值降低, 但断裂韧性的弱化效应随着循环次数的增加而降低。C. Zhang 等^[15]分析了不同加热条件下花岗岩的声发射特征参数, 研究了花岗岩的断裂时间、内部损伤演化过程和损伤模式。发现花岗岩热冲击损伤模式为以拉伸损伤为主的拉剪混合损伤模式, 当加热温度不变时, 加热速率越高, 拉伸裂纹的百分比越高。L. F. Fan 等^[16]对高温后花岗岩的细观变化特征进行了进一步的分析, 结果表明温度引起的矿物组分和热冲击作用导致花岗岩微结构变化发生改变, 进而引起力学特性的劣化。P. Y. Guo 等^[17]根据花岗岩矿物的含量和分布, 结合计算机断层扫描 (CT) 技术, 建立了基于颗粒模型 (GBM), 提出了一种考虑真实矿物分布的离散元数值模型, 在此基础上, 研究了花岗岩高温后的力学行为、裂纹扩展行为和破坏模式。

上述关于高温后不同类型岩石的物理力学性质的研究大多数是基于一维应力状态下进行的, 虽然地下工程围岩表面处于单向或两向应力状态, 但是内部岩石大多处于三向应力状态。因此, 需要进一步研究温度和围压共同作用下岩石的物理力学变化特征。近年来相关文献报道了高温后大理岩^[18]、砂岩^[19]、花岗岩^[20-21]常规三轴压缩条件下力学特性的试验研究, 其中一些学者同时开展了细观方面的研究^[19,21], 但更多侧重于定性分析。鉴于此, 本文开展了高温后花岗岩常规三轴压缩条件下力学试验, 结合不同温度处理后试样偏光显微镜观测结果, 量化了裂纹面积和平均裂纹宽度, 从细观上通过微裂纹参数定量揭示高温后花岗岩力学特征变化规律和机制, 为涉及高温的岩体工程开发的相关计算与数值模拟提供理论依据。

1 试验方案

1.1 岩样制备

试验所用花岗岩取自福建南安市石井镇某矿区, 棕红色, 均质性较好 (图 1)。依据《工程岩体试验方法标准》(GBT 50266—2013) 中规定, 精细加工制备成直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱形试样, 直径允许偏差小于 0.2 mm, 两端面允许偏差小于 0.05 mm 的不平整度^[22]。试样原始物理性质如表 1 所示, 表中我们给出了花岗岩加热前试样的纵波波速 (V_{p0}) 和加热后纵波波速 (V_{p1}), 平均初始纵波波速为 4167 m/s, 试样纵波波速标准差为 241 m/s, 可以说明原始试样纵波波速偏差较小, 保证了力学试验结果的准确性和可比性。花岗岩试样 X 射线衍射分析图谱如图 2 所示,

通过 X 射线衍射分析, 得到其主要矿物成分及含量百分比为: 钾长石 41.42%, 钠长石 30.79%, 云母 15.90%, 石英 11.89%。

1.2 试验方法

本文通过试验主要研究温度对常规三轴压缩条件下花岗岩力学特性的影响规律, 并利用偏光显微镜对高温后的花岗岩试样进行细观结构观测, 来揭示其宏观力学变化机制。首先, 利用干燥箱对加工后的试样进行干燥处理, 即置于干燥箱内在 105 °C 条件下干燥 24 小时, 以减小天然含水率对试验结果的影响。然后, 对所有试样进行纵波波速测量, 剔除波速异常试样以保证力学试验结果的准确性和可比性, 将剔除波速异常后的试样分成 6 组, 每组 5 个试样。接下来, 利用 SG-XL1200 型马沸炉将不同分组试样以 5 °C/min 升温速率加热至预设温度 (20 °C (常温)、200 °C、300 °C、400 °C、500 °C 和 600 °C), 恒温 2 h 后, 在高温炉内自然冷却。根据目前技术条件, 理想可采干热岩温度范围为 150 °C 至 500 °C, 埋藏深度为 5~6 km^[23]。因此, 本研究中的最高预设温度为 600 °C。



图 1 原状花岗岩试样展示图

Fig. 1 Untreated granite specimens

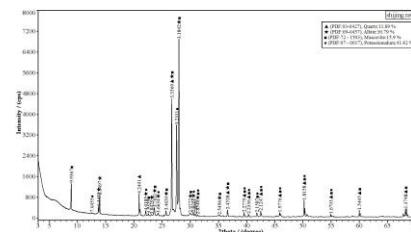


图 2 花岗岩试样 X 射线衍射分析图谱

Fig. 2 Analytical spectra of X-ray diffraction of granite

最后, 采用 TAW-2000 型微机控制电液伺服万能试验机对试样进行单轴和三轴压缩试验, 围压设定为 20、40 和 60 MPa。我国共和盆地恰卜恰干热岩的热采段在 3200 至 3705 m 之间, 最小主应力在 60 至 72 MPa 之间^[24], 因为我们选取的最大围压为 60 MPa。用 5 mm 位移传感器测量轴向压缩变形, 2000kN 力传感器量测轴向荷载。进行三轴加载试验时先设定为应力控制模式, 加载速率设定为 0.5 MPa/s, 施加至预定的围压, 此时岩样处于静水压力状态。然后切换成轴向位移控制模式, 加载速率设定为 0.3mm/min, 加载

至试样完全破坏为止, 试验过程中试样的载荷与变形由计算机自动采集并记录。将每组剩余的最后一个试样加工成薄片, 然后利用 DM4P 偏光显微镜观察不同温度处理后的试样细观结构。试验所有流程均符合《工程岩体试验方法标准》的规定, 具体试验结果见表 1。

表 1 高温后花岗岩常规三轴压缩下物理力学试验结果

Table 1 Physical and mechanical parameters of granite after high temperatures under conventional triaxial compression

σ_3 /MPa	T /°C	V_{p0} /(m/s)	V_{pl} /(m/s)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /MPa	E /GPa	ε_s /%
0	20*	4234	4234	163.69	23.29	0.893
0	200	4323	3571	148.05	22.12	0.949
0	300	4456	3030	128.57	21.60	0.916
0	400	4164	2564	130.10	20.20	1.104
0	500	3768	2000	124.02	19.37	1.184
0	600	3799	1087	71.24	10.57	1.613
20	20*	4426	4426	252.75	24.35	1.403
20	200	4325	3571	234.44	22.74	1.408
20	300	3941	2941	230.37	21.79	1.374
20	400	3789	2500	223.70	21.62	1.429
20	500	4346	2000	172.61	20.26	1.209
20	600	4369	1064	112.71	13.17	1.244
40	20*	4037	4037	294.17	24.43	1.603
40	200	3784	3571	274.87	23.20	1.654
40	300	4432	3030	268.82	22.69	1.641
40	400	4164	2564	269.59	21.64	1.532
40	500	4099	2000	190.49	20.51	1.306
40	600	4375	1099	121.79	14.73	1.242
60	20*	4372	4372	355.38	26.25	1.691
60	200	3867	3571	314.45	24.28	1.741
60	300	4241	2941	286.04	24.09	1.621
60	400	3864	2564	278.91	24.24	1.643
60	500	4390	2041	261.50	21.58	1.365
60	600	4432	1099	209.54	17.45	1.297

注: “*”表示为室温。

2 试验结果

2.1 应力-应变曲线

图 3 为不同围压情况下, 花岗岩试样在经历了 20 (常温)、200、300、400、500 和 600 °C后常规三轴压缩全应力-应变曲线。从图中可以看出, 在不同的高温作用下, 偏应力随轴向应变、径向应变和体积应变的演化规律大致相似。

不同的高温作用下花岗岩偏应力-轴向应变曲线主要表现为压实、弹性变形、屈服和破坏四个阶段。初始压实阶段随着温度从 20 °C增加到 600 °C而增加,

而随着围压的增加而明显减少。弹性变形阶段的偏应力随轴向应变呈线性增加, 不同温度条件下, 花岗岩试样的屈服阶段都很短。在破坏阶段, 偏应力在极小的轴向应变下急剧下降, 试样表现出明显的脆性破坏特征。

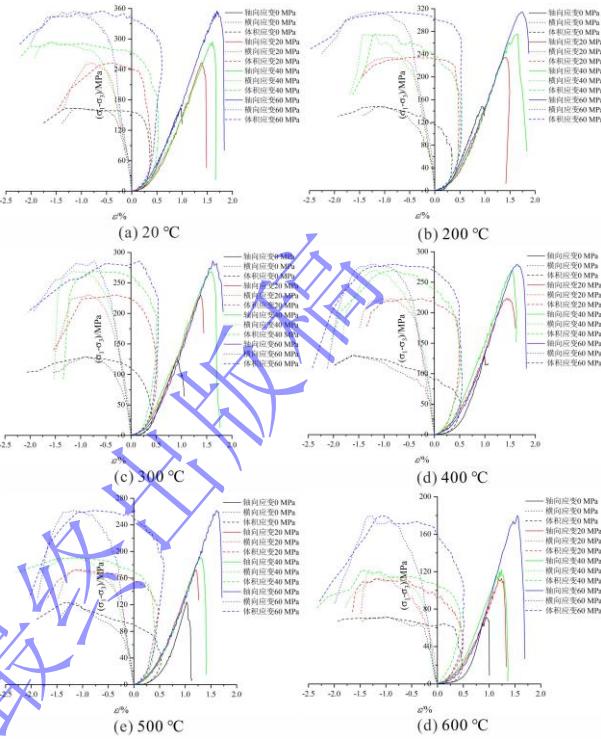


图 3 不同围压下高温后花岗岩试样常规三轴压缩全应力-应变曲线

Fig. 3 Complete stress-strain curves of granite heated to various temperatures under conventional triaxial compression with various confining pressure

随着热处理温度的升高, 在单轴压缩条件下, 应力-应力应变曲线整体上会有明显的塑性趋势^[12]。如图 3 所示, 花岗岩压密阶段随着温度的升高更加明显, 但是应力峰后阶段的塑性趋势体现的并不明显。一方面, 由于图 3 中轴向应变占有的比例较小, 在屈服-破坏阶段, 应力-应力应变曲线的塑性趋势表现得不明显。另一方面, 由于花岗岩具有较强的脆性特征, 试验过程中为了避免试样突然破坏对环线应变仪的损坏, 试验过程中峰值强度出现迅速降低后, 立即结束加载, 所以试验过程中峰后特征没有捕捉完全, 使得图 3 中应力峰后阶段没有体现明显的塑性趋势。

由于围压的存在对横向应变的扩展有抑制作用, 不同的高温作用下花岗岩径向应变随围压的增加而减小。体积应变可以近似为轴向应变和径向应变的两倍之和^[28]。如图 3 所示, 高温对体积应变的膨胀有很大影响, 整体上来看, 温度越高, 高温后花岗岩试样就越容易发生体积膨胀。由于篇幅限制, 可以通过纵向侧面对比温度对于应力应变曲线的影响, 从 20 °C增

加到 600 °C, 随着温度的升高, 高温后花岗岩屈服强度逐渐降低, 体积应变膨胀更加明显。

图 4 给出了不同温度和围压下花岗岩在加载和卸载条件下的体积应变-轴向应变曲线, 从图中可以更加直观地看出高温对花岗岩体积应变的膨胀有很大影响, 温度越高, 试样体积膨胀的越明显。扩容角 (θ) 为轴应变-体积应变曲线进入到扩容阶段后曲线近似直线与轴应变坐标轴夹角, 其反映温度和围压等环境的变化对试样扩容变形的影响, 为了进一步量化岩石进入扩容阶段的难易程度。Yuan 等^[29]提出了扩容指数 (I_d) 的概念, 具体表示为

$$I_d = \frac{\theta_p}{\theta_0} = \frac{\arctan(\Delta\varepsilon_{vc}/\Delta\varepsilon_{lp})_p}{\arctan(\Delta\varepsilon_{vc}/\Delta\varepsilon_{lp})_0} \quad (1)$$

式中: I_d 为扩容指数, 围压为 0 时为 1, 数值越大说明越容易进入到扩容状态; θ_0 和 θ_p 分别为单轴和三轴状态下的扩容角; $\Delta\varepsilon_{vc}$ 为塑性体积应变增量; $\Delta\varepsilon_{lp}$ 为塑性轴向应变增量; $\Delta\varepsilon_{vc}/\Delta\varepsilon_{lp}$ 为体积应变-轴向应变曲线进入到扩容阶段斜率。高温后花岗岩扩容角与扩容指数随温压变化的关系如图 5 所示, 不同温度条件下花岗岩扩容角和扩容指数均随围压的增大而减小。由此可知, 随着围压增大, 扩容越困难, 围压对扩容的抑制作用越大。

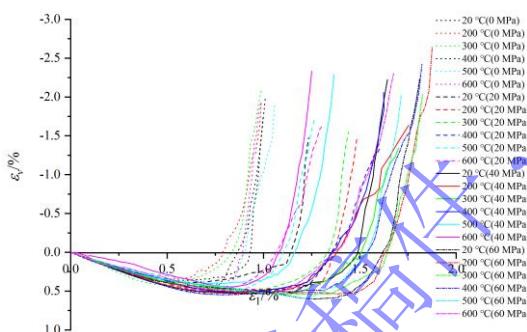


图 4 不同温度和围压下花岗岩在加载和卸载条件下的体积应变-轴向应变曲线

Fig. 4 Volumetric strain-axial strain curves of granite exposed to various temperatures under different confining stresses

2.2 抗压强度随温度变化

不同围压条件下花岗岩三轴抗压强度 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 随温度变化的关系如图 6 (a) 所示, 随着温度的升高, 不同围压条件下花岗岩三轴抗压强度逐渐降低。当温度大于 400 °C 时, 不同围压下三轴抗压强度变化幅度增大。与常温条件下不同围压作用下三轴抗压强度相比, 在 600 °C 时三轴抗压强度分别在不同围压条件下分别减小了 56.47%、55.40%、58.60% 和 41.04%。图 6 (b) 给出了不同温度条件下花岗岩三轴抗压强度随围压变化的关系, 从图中可以发现, 不同温度作用下花岗岩抗压强度具有明显的围压效应, 皆随围压的升

高而逐渐增大, 与常温条件下花岗岩随围压变化的趋势相似^[27]。

值得注意的是, 尽管本文试验选用的试样取自同一矿区同一岩块, 且通过波速剔除异常试样, 岩石内部不可避免地含有细观孔隙和裂隙, 使得岩石表现出非均质特征, 导致 600 °C 试样在 20 MPa 和 40 MPa 围压下峰值应力差异较小。

2.3 弹性模量随温度变化

本文弹性模量 (E) 的取值为轴向应力-应变曲线 30%~70% 峰值强度近似直线部分的斜率^[30]。图 7 (a) 描述了不同围压条件下花岗岩弹性模量随温度升高而逐渐降低, 与常温条件下相比, 400 °C 时不同围压条件下花岗岩弹性模量分别减小了 13.28%、11.21%、11.42% 和 7.65%; 而当温度达到 600 °C 时, 不同围压下弹性模量较常温条件下迅速下降分别下降了 54.63%、45.92%、39.72% 和 33.51%。可以认为 400 °C 为不同围压条件下花岗岩抗压强度和弹性模量变化阈值温度。不同温度条件下花岗岩弹性模量随围压变化的关系见图 7 (b) 和表 1。由于围压效应, 围压增强了不同温度条件下花岗岩弹性模量, 但当围压小于 40 MPa, 弹性模量变化较小。

与此同时, 尽管本文试验选用的试样通过波速进行了筛选, 岩石内部含有细观孔隙和裂隙导致岩石表现出非均质特征, 图 7 (a) 中 300 °C 试样在 20 MPa 时的弹性模量略低于 0 MPa, 且图 7 (b) 中围压为 20 MPa 时 400 °C 试样的 E 略高于 300 °C, 侧面反映了围压小于 40 MPa, 温度小于 400 °C 时弹性模量变化较小。

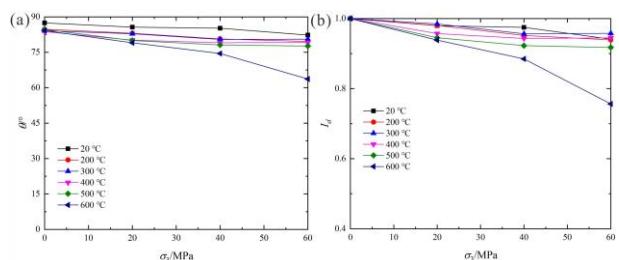


图 5 高温后花岗岩 (a) 扩容角、(b) 扩容指数与围压的关系

Fig. 5 Relationship between temperature and dilation angle (a), dilation index (b) of granite after exposure to various temperatures

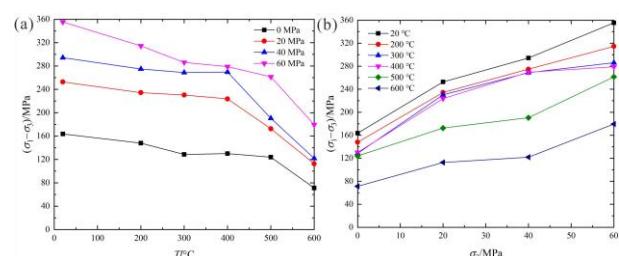


图 6 高温后花岗岩抗压强度与 (a) 温度、(b) 围压的关系

Fig. 6 Relationship between (a) temperature, (b) confining

pressure and triaxial compressive strength of granite after exposure to various temperatures

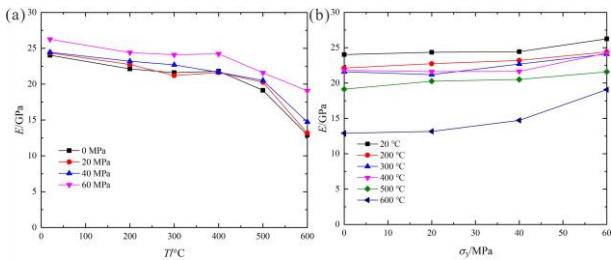


图 7 高温后花岗岩弹性模量与 (a) 温度、(b) 围压的关系

Fig. 7 Relationship between (a) temperature, (b) confining pressure and elastic modulus of granite after exposure to various temperatures

表 2 高温后花岗岩常规三轴压缩下的强度和变形参数

Table 2 Strength and deformation parameters of granite after high temperatures under conventional triaxial compression

T/°C	$\varphi/^\circ$	c/MPa	k	Q/MPa	拟合曲线	R ²
20	37.34	43.08	4.083	174.02	$\sigma_1=4.083\sigma_3+174.02$	0.988
200	35.05	42.14	3.698	162.01	$\sigma_1=3.698\sigma_3+162.01$	0.977
300	34.11	40.28	3.554	151.82	$\sigma_1=3.554\sigma_3+151.82$	0.931
400	33.49	40.79	3.462	151.73	$\sigma_1=3.462\sigma_3+151.73$	0.931
500	31.22	34.54	3.152	122.61	$\sigma_1=3.152\sigma_3+122.61$	0.977
600	30.97	18.47	3.120	65.23	$\sigma_1=3.120\sigma_3+65.23$	0.944

2.4 粘聚力、内摩擦角随温度变化

图 8 为高温后试样最大轴向应力与围压的关系, 从图 8 可以看出, 常温 20 °C 和经 200、300、400、500、600 °C 处理后, 在 0、20、40 和 60 MPa 围压作用下, 试样最大轴向应力随围压增大而单调增加, 符合 Mohr-Coulomb 准则, 该准则利用粘聚力和内摩擦角系数来解释岩石强度特征。

根据 Mohr-Coulomb 强度准则:

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + Q \quad (2)$$

式中: σ_1 和 σ_3 分别为最大轴向应力和围压; Q , k 为材料强度参数, 其值与材料的内摩擦与粘聚力 c 的关系为^[25]

$$\phi = \arcsin(k-1)/(k+1) \quad (3)$$

$$c = Q(1-\sin\phi)/2\cos\phi \quad (4)$$

利用最小二乘法按式 (2) 回归得到峰值轴向应力与围压的关系, 具体的关系式和相关系数见表 2, 并根据关系式将拟合曲线在图 8 中给出, 相关系数均大于 0.9308, 说明高温后试样常规三轴压缩强度与围压具有良好的线性关系。

粘聚力和内摩擦角是反映岩体抗剪强度的重要指标。图 9 给出了高温后试样粘聚力、内摩擦角与温度的关系, 从图中可以发现粘聚力整体上随温度而逐渐减小, 与常温 20 °C 试验值相比, 经 400、500、600 °C 处理后粘聚力降幅依次为 5.32%、19.82%、57.13%, 当温度大于 400 °C 时, 下降幅度迅速增加。粘聚力体现岩体内部的粘结程度, 与岩石内部矿物本身粒径、胶结程度及胶结物有关, 随温度升高花岗岩内部矿物颗粒的胶结程度减弱。

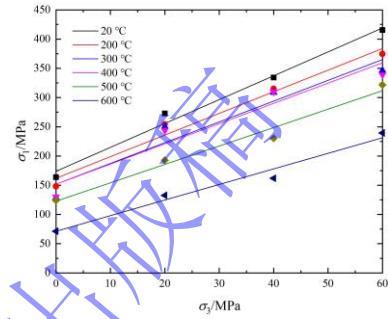


图 8 高温后试样最大轴向应力与围压的关系

Fig. 8 Relationships between the maximal stress and confining pressure of granite after exposure to various temperatures

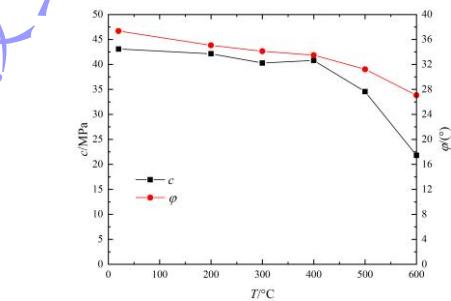
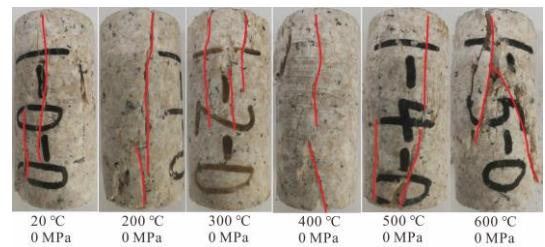
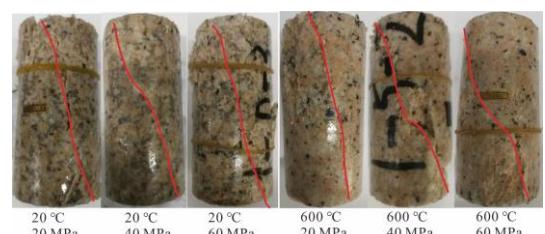


图 9 高温后试样粘聚力、内摩擦角与温度的关系

Fig. 9 Relationships between cohesion, friction angle and temperature



(a) 单轴压缩试验



(b) 三轴压缩试验

图 10 不同高温后花岗岩试样破坏形态

Fig. 10 Failure modes of granite after exposure to various temperatures

从图 9 和表 2 可以看出, 内摩擦角随温度的升高呈线性下降, 常温下花岗岩内摩擦角为 37.34° , 经 200、300、400、500 和 600 $^\circ\text{C}$ 高温处理后内摩擦角分别降低 6.12%、8.63%、10.31%、16.39% 和 17.06%。

表 3 高温后花岗岩微裂纹参数

Table 3 Microcrack parameters of granite after high temperatures

T/°C	区域 1		区域 2		平均值	平均值
	$\phi_s/$ %	$W_a/\mu\text{m}$	$\phi_s/$ %	$W_a/\mu\text{m}$		
20	0.18	2.24	0.25	2.48	0.22	2.36
200	0.58	4.33	0.68	5.23	0.63	4.78
300	0.92	5.43	1.34	6.96	1.13	6.20
400	1.20	6.28	1.83	8.33	1.52	7.30
500	1.91	8.13	2.57	9.76	2.24	8.94
600	3.54	10.91	3.81	11.09	3.67	11.00

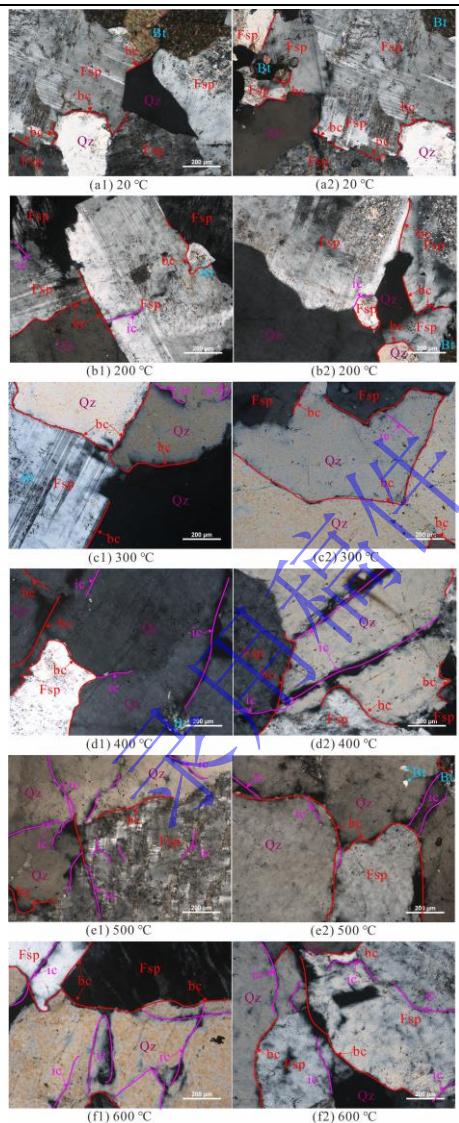


图 11 高温后花岗岩偏光显微镜图像 (图中 Qz、Fsp、Bt 分别表示石英、长石、云母; bc、ic 分别表示晶间裂纹和穿晶

裂纹)

Fig. 11 Optical microscopic pictures of granite after exposure to different temperatures

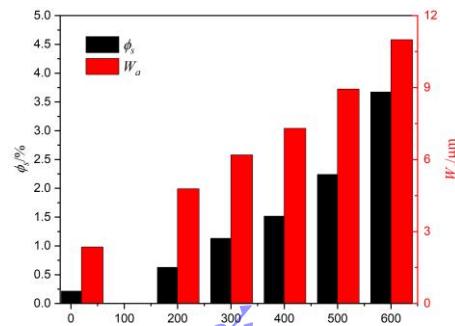


图 12 高温后花岗岩温度与裂纹面积百分比、平均裂纹宽度的关系

Fig. 12 Relationships between temperature, percentage of microcrack area, microcrack average width of granite after exposure to various temperatures

2.5 破坏特征

岩石宏观破坏特征受多方面因素影响, 主要包括内因(岩性、细观结构特征等)和外因(外部应力状态)^[26]。岩石发生宏观破坏本质上是岩石在外力的作用下由微裂纹逐渐萌生、扩展和交汇最终形成宏观裂纹的过程^[27]。高温处理使得岩石的细观结构发生变化, 进而改变了岩石的宏观破坏特征。

单轴和三轴压缩条件下不同高温后花岗岩试样破坏形态见图 10, 从图 10 (a) 可以看出, 当温度小于 400 $^\circ\text{C}$ 时, 单轴压缩条件下高温后花岗岩破坏形式主要微轴向劈裂破坏。大于 400 $^\circ\text{C}$ 时, 破坏形式由轴向劈裂破坏向剪切破坏过渡, 600 $^\circ\text{C}$ 时, 由于高温萌生更多微裂纹, 破坏后的岩石更加破碎。三轴压缩条件下高温后花岗岩破坏形式皆呈现为剪切破坏, 围压对花岗岩破坏形态具有很大的影响, 与常温状态下相比, 600 $^\circ\text{C}$ 条件下破坏后的岩石并没有表现得更加破碎, 这也侧面体现了围压对破坏特征的影响, 且高温没有改变岩石的破坏形式。

2.6 细观结构

细观结构分析过程中, 在不同温度作用后花岗岩试样同一显微薄片上取两个不同观测位置, 并对测试结果求取平均值, 来避免花岗岩的非均质性导致的观察区域选取引起的偶然性对统计结果的影响。为图 11 不同温度后花岗岩放大 200 倍的偏光显微镜照片。原状花岗岩矿物颗粒接触紧密, 结晶良好, 试样整体性较好, 但在部分颗粒间观察到少量微裂隙(图 11(a))。200 $^\circ\text{C}$ 时, 在矿物边界产生少量晶间裂纹, 且微裂纹比较细小(图 11(b)), 在图 11(b2) 长石边界附近

发现较少的穿晶裂纹。300 °C时，在矿物晶体边界产生更多微裂纹，裂纹形态比较清晰，且在石英和长石内部观察到了穿晶裂纹（图 11（c））。由图 11（d）可以看出，试样在经 400 °C高温处理后，矿物晶间和穿晶裂纹进一步扩展延伸。500 °C时，微裂纹数目进一步增加，更多的穿晶裂纹出现在石英和长石内部。随着热处理温度进一步升高，花岗岩内部产生更多的微裂纹，这些微裂纹进一步扩展、加宽和贯通，局部形成了微裂纹网络（图 11（f））。

为了进一步定量分析高温后花岗岩微裂纹演化规律，我们利用 ImageJ 图像处理软件对图 11 中裂纹长度 (L_c) 和面积 (S_c) 进行捕捉统计，引入了裂纹面积百分比 (ϕ_s) 和平均裂纹宽度 (W_a) 进行分析，具体定义如下：

$$\phi_s = \frac{S_c}{S} \times 100\% \quad (5)$$

$$W_a = \frac{S_c}{L_c} \quad (6)$$

式中： ϕ_s 为裂纹面积百分比，%； S_c 为 ImageJ 捕获的裂纹面积， mm^2 ； S 为花岗岩薄片观测区域的总面积， mm^2 ； W_a 为平均裂纹宽度， μm ； L_c 为 ImageJ 捕获的裂纹长度， mm 。

高温后花岗岩温度与裂纹面积百分比、平均裂纹宽度的关系如图 12 和表 3 所示，裂纹面积百分比、平均裂纹宽度均为同一显微薄片上取两个不同观测位置的观测结果的平均值。从图 12 和表 3 可以发现， ϕ_s 和 W_a 皆随温度的升高而逐渐增大，未经高温处置试样 ϕ_s 和 W_a 分别为 0.22% 和 2.36 μm ，随着温度升高到 400 °C， ϕ_s 和 W_a 进一步增加到 1.52% 和 7.30 μm ，600 °C 时， ϕ_s 和 W_a 分别达到了 3.67% 和 11.00 μm ，与力学参数随温度变化的趋势相对应。

3 讨论

岩石发生宏观破坏本质上是岩石在外力的作用下由微裂纹逐渐萌生、扩展和交汇最终形成宏观裂纹的过程^[27]，高温作用改变了岩石细观结构，进而改变了岩石宏观强度和变形特征及破坏形式。首先，随着温度的升高，岩石内部不同状态的水逐渐析出，吸附水、结晶水和结构水分别在室温 100 °C、100~300 °C 和 300~500 °C 范围内逸出^[31]，吸附水逸出使得岩石试样内部孔隙增大，结晶水和结构水的析出可能破坏了原有矿物细观构造，导致矿物晶格骨架的破坏^[32]，导致岩石的微裂隙和孔隙的增加。

其次，随着温度的逐渐升高，岩石矿物晶体受热膨胀进而导致内部结构产生变化。由于不同种类矿物

的膨胀系数有所不同，即使同一矿物沿不同结晶方向的膨胀系数也不尽相同，因而前者在不同种类矿物间产生差异性膨胀导致矿物晶体间产生晶间裂纹，后者在矿物晶体内部产生差异性膨胀导致矿物晶体内部产生穿晶裂纹^[33]。本文所选取的花岗岩主要矿物为石英和长石，石英和长石热膨胀系数随加热温度的变化的关系如图 13 所示，从图中可以发现两者热膨胀系数有明显的差异，石英沿不同结晶方向的热膨胀系数皆大于长石的热膨胀系数^[34]。如图 11（b）所示，在石英和长石矿物间最先产生微裂纹。随着温度进一步增大，石英和长石沿不同结晶方向的热膨胀系数差异也逐渐增大，达到一定限度后，在矿物晶体内部就会萌生穿晶裂纹（图 11）。温度越高，矿物间及矿物沿不同结晶方向的热膨胀差异就越剧烈，越多的晶间及晶内微裂纹萌生。

与此同时，矿物晶体在温度升高的过程中可能会发生一些物理变化，C. Simpson^[35]发现斜长石在温度超过 450~500 °C 时晶体可能会经历稳态位错蠕变。P. W. J. Glover^[36]指出石英在 573 °C 左右会由 α 相变为 β 相，在这一过程中，石英的体积大约膨胀 4.5%，引起石英与其它矿物晶体间膨胀热应力的增加，600 °C 时石英内部微裂纹进一步扩展（图 11（d））。这些变化最终导致花岗岩细观结构发生改变，微裂纹不断，不断扩展、加宽和最终贯通逐渐形成微裂纹网络。

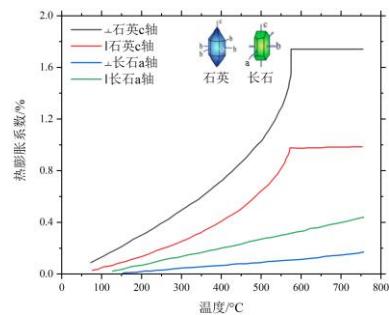


图 13 石英和长石热膨胀系数随加热温度的变化^[34]

Fig. 13 Changes of thermal expansion coefficient of quartz and feldspar with temperature

随着微裂纹的不断萌生、扩展和交汇，花岗岩抗压强度和弹性模量随温度而逐渐减小（图 6（b）和图 7（b）），而轴向应变和体积应变随温度的升高而逐渐增大，而围压抑制了岩石的侧向膨胀，导致岩石的强度和变形参数随围压的增加而增大。随着微裂纹的演化，矿物晶体间距增大，导致矿物粘聚力随温度的升高而逐渐减小（图 9）。岩石微裂纹的发育到一定程度后也改变了岩石的破坏形式，随着温度的逐渐升高，单轴压缩条件下试样破坏形式由轴向劈裂破坏向剪切破坏过渡。

文中高温预设的温度为 200、300、400、500、600 °C，以 100 °C 为温度区间进行分析高温后花岗岩

三轴压缩条件下力学特性。从文中试验结果(图 6(b)、图 7(b)、图 9 和图 12)可得, 当温度介于 400~500 °C 时, 高温后花岗岩峰值偏应力、弹性模量和粘聚力降低幅度总体上有突然增大的趋势, 且微裂纹的密度和平均宽度总体上也有突然增大的趋势, 破坏形态也由轴向劈裂破坏向剪切破坏过渡, 这一变化与斜长石位错蠕变温度(450~500 °C)一致。与此同时, 当温度介于 500~600 °C 时, 力学强度参数降低的幅度更加明显, 600 °C 后试样剪切破坏更加明显, 微裂纹参数也发生相应的变化, 力学性质的进一步变化与石英相变温度(573 °C)变化一致。整体而言, 当温度大于 400 °C 时, 花岗岩力学特性变化幅度增大, 力学特性变化阈值温度应在 400 °C 之上。P. Y. Guo 等^[17]通过基于计算机断层扫描和颗粒模型(CT-GBM)建立的花岗岩热-力学耦合数值模型结果发现, 当 $T \leq 450$ °C 时, 微裂纹的发展不明显, 花岗岩的纵波波速度略有下降, 力学性能变化不明显; 当 $T > 450$ °C 时, 微裂纹迅速扩展, 试样中局部形成断裂网络和断裂带, 花岗岩的纵波速度和力学性显著劣化。

通过本文的试验结果可以得出高温后花岗岩三轴抗压强度和弹性模量皆随温度的升高而逐渐降低, 与 20 °C 试验值相比, 400 °C 时不同围压条件下抗压强度和弹性模量的均值分别降低了 15.47% 和 10.89%, 而 500 °C 时抗压强度和弹性模量的均值降幅显著增加, 分别达到了 29.40% 和 16.86%。高温后花岗岩粘聚力和内摩擦角皆随温度的升高而降低, 与常温试验值相比, 经 400、500 和 600 °C 处理后粘聚力降幅依次为 5.32%、19.82%、57.13%, 当温度大于 400 °C 时, 下降幅度迅速增加。从细观试验结果上看, 400 °C 时, ϕ_s 和 W_a 分别为 1.52% 和 7.30 μm , 500 °C 时, ϕ_s 和 W_a 分别达到了 2.24% 和 8.94 μm , 而 600 °C 时, ϕ_s 和 W_a 进一步增加到了 3.67% 和 11.00 μm , 由图 11 可以看出, 500 °C 时, 微裂纹数目进一步增加, 更多的穿晶裂纹出现在石英和长石内部, 初步形成了微裂纹网络, 使得高温后花岗岩试样宏观力学强度劣化幅度较 400 °C 时增加明显。温度大于 400 °C 时, 细观结构变化与力学参数随温度变化的趋势相对应, 本文阈值温度应大于 400 °C。因此, 我们接下来将细化研究温度, 进一步准确分析花岗岩强度和变形参数及破坏形式变化的阈值温度。

4 结论

(1) 高温后花岗岩三轴抗压强度和弹性模量皆随温度的升高而逐渐降低, 随围压的升高而增大。与常温条件下相比, 600 °C 时单轴抗压强度和弹性模量分别降低了 56.47% 和 54.63%, 而 60 MPa 条件下, 三轴

抗压强度和弹性模量仅降低了 41.04% 和 33.51%。高温对花岗岩体积应变的膨胀有很大影响, 温度越高, 试样体积膨胀的越明显, 且高温后花岗岩粘聚力和内摩擦角皆随温度的升高而降低。

(2) 温度大于 400 °C 时, 花岗岩强度和变形参数降低幅度呈现突然增大的趋势, 且微裂纹的密度和平均宽度总体上也呈现突然增大的趋势, 单轴压缩条件下破坏形态也由轴向劈裂破坏向剪切破坏过渡, 花岗岩强度和变形参数及破坏形式变化的阈值温度应大于 400 °C。

(3) ϕ_s 和 W_a 皆随温度的升高而逐渐增大, 400 °C 时, ϕ_s 和 W_a 进一步增加到 1.52% 和 7.30 μm , 随着温度升高到 600 °C 时, ϕ_s 和 W_a 分别达到了 3.67% 和 11.00 μm , 与力学参数随温度变化的趋势相对应, 岩石内部水分子逸出、矿物晶体膨胀系数的差异及矿物晶体物理变化导致花岗岩试样内部晶间和晶内微裂纹逐渐萌生、扩展和交汇成裂纹网络, 导致高温后花岗岩力学特性的变化。

参考文献:

- [1] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 217-232.(XIE Heping, LI Cunbao, GAO Mingzhong, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 217-232. (in Chinese))
- [2] ZHU Z N, YANG S Q, RANJITH P G, et al. A comprehensive review on mechanical responses of granite in enhanced geothermal systems (EGSs). Journal of Cleaner Production, 2023, 383: 135378.
- [3] 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(03): 457-467. (WU Xinghui, CAI Meifeng, REN Fenhua, et al. Evolutions of P-wave velocity and thermal conductivity of granite under different thermal treatments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 457-467. (in Chinese))
- [4] 秦严, 田红, 徐能雄, 等. 高温后闪长岩部分物理性质实验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1226-1231.(QIN Yan, TIAN Hong, XU Nengxiong, et al. Experimental study on partial physical properties of post-high-temperature diorite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1226-1231. (in Chinese))
- [5] SRINIVASAN V, HASAINAR H, SINGH T N. Experimental study on failure and fracturing attributes of granite after thermal treatments with different cooling conditions.

- Engineering Geology, 2022, 310: 106867.
- [6] FERRERO A M, MARINI P. Experimental Studies on the Mechanical Behaviour of two Thermal Cracked Marbles[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2001, 34(1): 57-66.
- [7] JIA P, QIAN Y, WANG Q, et al. Mechanical and electrical responses of natural-cooled high-temperature granite of different grain sizes[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1): 158.
- [8] XI Y, XING J H, JIANGH L, et al. Pore characteristic evolution and damage deterioration of granite subjected to the thermal and cooling treatments combined with the NMR method[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2023, 82: 182.
- [9] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 高温与不同水压下深部砂岩渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1117-1128.(ZHANG Peisen, ZHAO Chengye, HOU Jiqun, et al. Experimental study on seepage characteristics of deep sandstone under high temperature and different hydraulic pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 111-1128. (in Chinese))
- [10] WANG G, YANG D, ZHAO Y S, et al. Experimental investigation on anisotropic permeability and its relationship with anisotropic thermal cracking of oil shale under high temperature and triaxial stress[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 718-725.
- [11] TIAN H, ZIEGLER M, KEMPKA T. Physical and mechanical behavior of claystone exposed to temperatures up to 1000 °C[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 70: 144-153.
- [12] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性能初步研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 332-335.(XU Xichang, LIU Quansheng. 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))
- [13] WU Y C, HUANG L Q, LI X B, et al. Effect of cooling methods on mechanical behaviors and thermal damage distributions of granite: Experiments and simulations[J]. Geothermics, 2023, 114: 102796.
- [14] CAO R H, FAN L, QIU X Y, et al. Effect of heating–water cooling cycle treatment on the pore structure and shear fracture characteristics of granite[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 286: 109263.
- [15] ZHANG C, FENG Z, MI C, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of high temperature thermal shock directional fracturing of granite with different heating conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 289: 109427.
- [16] FAN L F, GAO J W, WU Z J, et al. An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 505-519.
- [17] GUO P Y, BU M H, ZHANG P, et al. Mechanical Properties and Crack Propagation Behavior of Granite After High Temperature Treatment Based on a Thermo-Mechanical Grain-Based Model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(9): 6411-6435.
- [18] 李浩然, 王子恒, 孟世荣, 等. 高温三轴应力下大理岩损伤演化与声发射活动特征研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2672-2682.(LI Haoran, WANG Ziheng, MENG Shirong, et al. Acoustic emission activity and damage evolution characteristics of marble under triaxial stress at high temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2672-2682. (in Chinese))
- [19] 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.
- [20] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite under in-situ stress and temperature conditions: An application to geothermal energy extraction[J]. Geothermics, 2017, 65: 44-59.
- [21] CHEN Z, SHA S, XU L, et al. Damage Evaluation and Statistic Constitutive Model of High-Temperature Granites Subjected to Liquid Nitrogen Cold Shock. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55: 2299-2321.
- [22] 中华人民共和国国家标准编写组. GBT 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013: 19-22.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GBT 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass[M]. Beijing: China Planning Press, 2013: 19-22. (in Chinese))
- [23] BREDEE K, DZEBISASHVILI K, LIU X L, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future[J]. Geothermal Energy, 2013, 1(1): 4.
- [24] LEI Z H, ZHANG Y J, YU Z W, et al. Exploratory research into the enhanced geothermal system power generation project: the Qiabuqia geothermal field, Northwest China. Renewable Energy, 2019 139: 52-70.
- [25] 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 Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2246-2252. (in Chinese))
- [26] TIAN H, MEI G, JIANG G S, et al. High-Temperature Influence on Mechanical Properties of Diorite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(6): 1661-1666.
- [27] 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): 1173-1180.(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): 1173-1180. (in Chinese))
- [28] 赵国彦, 戴兵, 董陇军, 等. 不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3121-3127.(ZHAO Guoyan, DAI Bing, DONG Longjun, et al. Experimental research on mechanical characteristics and strength criterion of rock of triaxial unloading tests under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3121-3127. (in Chinese))
- [29] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(4): 679-686.
- [30] 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 the variation of mechanical properties of granite under the action of temperature and stress cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 705-714. (in Chinese))
- [31] ZHANG F, ZHAO J J, HU D W, et al. Laboratory investigation on physical and mechanical properties of granite after heating and water-cooling treatment. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(3): 677-694.
- [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. 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))
- [33] CLARK S P. Handbook of physical constants [M]. the Geological Society of America, 1966.
- [34] WINKLWE, E. Stone in Architecture[M]. Spring, Berlin, 3rd edition, 1994.
- [35] SIMPSON C. Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition[J]. Journal of Structural Geology, 1985, 7(5): 503-511.
- [36] GLOVER P W J, BAUD P, DAROT M, et al. α/β phase transition in quartz monitored using acoustic emissions. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1995, 120(3): 775-782.