

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1383

高温花岗岩水冷却后物理力学特性及微观破裂特征

贾 蓬^{1,2}, 杨其要¹, 刘冬桥², 王述红¹, 赵 永¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 为研究热储层建造时高温岩体水冷却后的物理力学特性及其微观破裂特征, 对常温、200、400、600、800 °C 5 个组别的花岗岩样进行水冷却冲击后的岩样开展单轴压缩试验, 结合超声波无损检测、XRD 衍射和偏光显微镜观察等手段, 对其宏、微观破裂特征进行分析。结果表明, 随温度升高, 高温花岗岩水冷却后的单轴抗压强度峰值不断降低, 峰值应变不断增大, 岩样破坏由突发性破坏向渐进性破坏转变; 岩样的质量损失率、体积增长率和密度降低率均随温度升高而增加, 波速随温度升高而降低, 在 400~600 °C 之间水冷却岩样体积膨胀率随温度升高显著增加, 600~800 °C 岩样的波速衰减率幅度减小; 温度梯度越大, 热冲击导致的穿晶裂纹越多, 大量沿晶裂纹和穿晶裂纹导致岩样单轴压缩破坏由张剪复合破坏转变为剪切破坏为主, 破坏时伴有大量粉末状碎屑的主要原因。

关 键 词: 高温花岗岩; 水冷却; X 射线衍射; 损伤劣化; 超声波

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)06-1568-11

Physical and mechanical properties and related microscopic characteristics of high-temperature granite after water-cooling

JIA Peng^{1,2}, YANG Qi-yao¹, LIU Dong-qiao², WANG Shu-hong¹, ZHAO Yong¹

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to understand the deterioration of physical and mechanical properties of high-temperature rocks, and the related microscopic characteristics after water-cooling during the thermal reservoir construction, uniaxial compression tests were conducted on five groups of granite samples, which at normal temperature and 200, 400, 600, and 800 °C had experienced water-cooling shocks, respectively. Ultrasonic testing, XRD and polarizing microscope observation were adopted to analyze the microscopic failure mechanics of rocks. Results show that with the increase of rock temperature, the peak strength decreases gradually with an increase of the peak strain, and the failure mode changes from sudden brittle failure to progressive failure. The mass loss rate, volume expansion rate, and density reduction rate increase with the increase of temperature, except for the ultrasonic wave velocity. The volume expansion rate of cooled rock samples increases significantly when the temperature ranges from 400 °C to 600 °C, and the attenuation rate of wave-velocity of rock samples decreases when the temperature ranges from 600 °C to 800 °C. It is found that the larger the temperature gradient, the more the transgranular cracks form due to the water-cooling shocks. A large number of transgranular and intergranular cracks cause the failure modes of rock samples under uniaxial compression to change from tension-shear failure to shear dominant failure accompanied by a large amount of powdery debris.

Keywords: high-temperature granite; water-cooling; X-ray diffraction; damage deterioration; ultrasonic wave

1 引 言

近年来, 随着不可再生传统化石资源的日趋减

少, 开发干热岩地热能资源被世界各国认为是未来能源的重要出路^[1]。干热岩是指地下埋深数千米, 内部存在少量或不存在流体, 温度高于 180 °C 的一

收稿日期: 2020-09-14

修回日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(No.U1710253, No.U1903216, No.52004052); 中央高校基本科研业务专项资金(No.N180701005); 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(No.SKLGDUK1920); 辽宁省重点科技计划项目(No.2019JH2/10100035)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(U1710253, U1903216, 52004052), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(N180701005), and the Open Funds of State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing(SKLGDUK1920) and the Key Research and Development Program of Science and Technology in Liaoning Province (2019JH2/10100035).

第一作者简介: 贾蓬, 女, 1973 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事深部岩石力学与工程方面的教学与研究。E-mail: polorjia@163.com

种异常高温岩体^[2]。已有研究发现, 高温地热能主要蕴藏在花岗岩中^[3-4], 而在实际工程中干热岩开发热储层建造时, 通常采用水力压裂增强储层渗透性, 提高热交换效率。此外, 在钻井过程中井壁围岩也会与钻井液或泥浆接触, 因此, 在增强地热系统(EGS)建造时, 无论人工热储层建造还是高温岩体钻井, 都会遇到高温岩体水冷却问题^[5-6]。高温使岩石内部产生一系列物理化学变化, 而水冷却形成的温度冲击又加剧了岩石内部的损伤。了解高温岩石水冷却过程中的宏观物理力学特性与其细观损伤机制的关系, 对于热储存建造具有重要意义。

目前已有不少学者针对高温岩石或者高温后自然冷却岩石的力学性质开展了研究。赵怡晴等^[7]对热处理后砂岩进行了单轴压缩试验, 发现 450 °C 以下, 砂岩矿物成分变化较小, 其峰值强度主要受孔隙率增加的影响, 超过 450 °C 后, 其峰值强度与矿物成分变化密切相关。尹乾等^[8]研究了温度和加载速率对花岗岩断裂特性的影响规律, 发现高温后花岗岩具有明显的加载速率效应。支乐鹏等^[9]研究了高温花岗岩自然冷却后的动态力学特性, 表明 110 °C 之前温度对花岗岩产生负损伤, 超过这一温度点后动态抗压强度和峰值应变不断劣化; Chen 等^[10]研究了不同升温速率对北山花岗岩的热损伤, 发现当温度超过 573 °C 时, 物理力学性能随温度的升高减弱效应更加明显。张强勇等^[11]研究了温度、围压、轴压对片麻状花岗岩蠕变特性的影响, 指出岩样的蠕变性能随加载应力的增加和温度的升高呈指数型变化, 并表明片麻状花岗岩高温后蠕变破坏模式主要为斜向剪切破坏。

此外, 不少学者从细观角度探讨了高温岩石破裂的细观机制。Yang 等^[12]利用 X 射线、显微镜、CT 等分析了不同温度下花岗岩的劣化机制, 发现 400~600 °C 晶界裂纹和穿晶裂纹是导致强度和刚度降低主要原因, 700~800 °C 晶界裂纹和穿晶裂纹的相互作用与合并导致损伤劣化进一步加剧, 并指出 600 °C 是花岗岩从脆性断裂到韧性断裂的临界温度。赵亚永等^[13]比较了不同温度处理后砂岩、花岗岩和大理岩微观结构的变化特征, 认为热损伤岩石的宏观物理力学性质与其形成条件、矿物成分、微裂纹发育密切相关。Shao 等^[14]研究了温度对层状辉岩花岗岩在无侧限应力条件下的力学行为影响, 并通过电镜扫描(SEM)图像揭示了内部裂纹随温度升高的扩展规律, 指出微裂纹扩展不仅取决于晶粒束缚, 还要取决于一些较弱的矿物成分。吴刚等^[15]通过高温下花岗岩单轴压缩与声发射试验, 分析了

岩石在热作用下内部热裂纹的扩展规律, 并通过偏光显微镜得到了岩样不同温度下的细观结构形态特征。张帆等^[16]对热处理后的花岗岩中主要矿物成分进行纳米压痕试验, 研究了各热处理温度段花岗岩宏观力学性能与矿物组分和微观结构的直接相关关系, 发现 300 °C 以内微观结构基本无微裂纹产生, 300 °C 以后开始产生裂隙并随温度升高不断扩展。

上述研究为进一步研究高温岩石水冷却后的力学特性奠定了基础。靳佩桦等^[17]对高温花岗岩水冷却后进行了孔隙结构及渗透性试验研究, 指出 400 °C 是渗透率变化的阈值温度, 中孔孔隙含量的增加是花岗岩孔隙率及渗透率大幅提升的主要原因。Shao 等^[18]研究了 3 种不同颗粒尺寸热处理花岗岩水冷却后的物理力学性质, 发现高温后水冷却作用对粗粒度花岗岩影响较大。Zhang 等^[19]通过热导率试验、超声波脉冲速度试验、透气性试验和三轴压缩试验表征了高温花岗岩在不同冷却方式下的物理力学变化, 发现热处理后花岗岩物理力学性能明显劣化, 且 500 °C 以后弹性模量和黏聚力增幅明显下降。邵保平等^[20]研究了 600 °C 以内高温状态花岗岩水冷却后物理力学特性, 发现超声波波速、单轴抗压强度、抗拉强度及弹性模量均随温度升高而不断降低, 并指出抗拉强度随温度变化规律符合负指数函数关系。Kumari 等^[21]分别研究了高温花岗岩自然冷却、水冷却及持续高温下的单轴压缩力学行为, 指出由于突然的热冲击, 水冷却的影响要比空气自然冷却的影响大得多。上述研究表明, 热冲击对于花岗岩的力学特性有显著的影响, 然而有关这一影响的细观机制, 目前的研究较少。朱振南等^[22]通过扫描电镜微观图像初步探讨了 500 °C 以内高温花岗岩水冷却后样品细观微裂纹扩展情况。朱要亮等^[23]对高温花岗岩水冷却后冲击破碎样品进行了电镜扫描, 研究了冲击破坏后微观形貌变化规律。

综上所述, 目前对高温花岗岩或高温后自然冷却花岗岩开展的研究较多, 而对高温花岗岩水冷却后物理力学特性, 尤其是受温度-应力作用损伤劣化后的矿物成分、晶体结构、内部裂纹发育扩展等与其宏观物理力学特性的相互关系研究较少, 对 500 °C 以上高温花岗岩水冷却后的细观损伤情况的研究尚不多见。本文分别对常温、200、400、600、800 °C 5 个组别的花岗岩进行水冷却冲击后的岩样开展单轴压缩试验, 并借助超声波无损检测、XRD 分析和偏光显微镜观察等手段, 研究高温花岗岩水冷却作用后的宏观物理力学性能劣化特征及与微细

观损伤的内在联系,从微细观角度揭示高温花岗岩水冷却后的宏观表现的内在机制。

2 试验概况

2.1 试样制备

试验所用花岗岩取自辽宁锦州某矿区,宏观均匀性较好,无明显缺陷,平均密度为 2.628 g/cm^3 ,X 射线衍射分析其主要矿物成分为长石(钙钠长石) 65%~70%、石英 25%~30%、云母 10%~15%及少量角闪石 5%~10%。试样根据国际岩石力学学会(ISRM)试验建议方法,制备直径为 50 mm、高为 100 mm 的花岗岩圆柱体试样,两端平整度及垂直度不超过 0.2 mm。为减小试样之间的差异性,试验前对所有试样用高精度电子天秤量测质量,用游标卡尺量测尺寸,利用湘潭天鸿研究所生产的 HS-YS403B 型岩石声波参数测试仪进行纵波波速测试。参考密度和纵波波速值的相近性,剔除差异性较大的岩样并进行编号分组,每组试样数量均为 3 个,基本物理参数见表 1。

表 1 花岗岩试样基本物理参数

Table 1 Physical parameters of granite samples

质量/g	体积/cm ³	密度/(g · cm ⁻³)	纵波波速/(m · s ⁻¹)
518.0±0.4	197.2±2.2	2.63±0.03	3 750±30

2.2 试验方法

试验设计加热范围分为常温、200、400、600、800 °C 5 个温度等级。采用日本电产 SHIMPO (新宝)生产的 MYC-5 智能温控电窑炉,以 2 °C/min 的升温速率^[24]加热至预定温度,保温 4 h 以确保试样充分均匀受热;之后从炉膛中快速取出,浸入盛有 25 °C 自来水的器皿中充分冷却;待水温不再升高后,放入干燥箱中 105 °C 烘干处理 24 h^[25],测量此时岩样的质量、体积、波速,并观测表观形态变化;采用位移控制方式,以 $0.003 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 加载速率,对岩样进行加载,直至试样失去承载能力;收集破坏后样品碎块,拼接复原其破坏形式原貌,最后取部分碎块样品制备 0.03 mm 薄片,利用偏光显微镜探究其微观破裂面形貌变化规律。

3 试验结果与分析

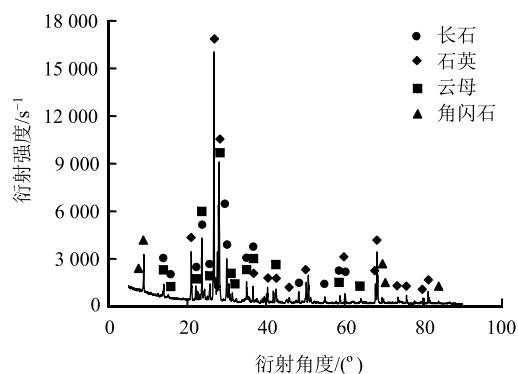
3.1 高温花岗岩水冷却后物性特征分析

3.1.1 X 射线衍射分析及表观形貌损伤

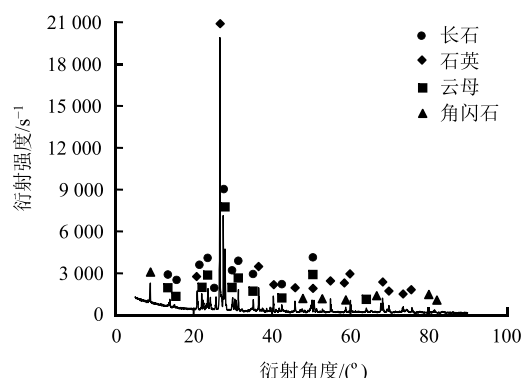
岩石宏观形貌的改变受其矿物成分变化的影响,包括矿物成分的氧化、分解、相变等均会在一定程度上影响岩石的表面形貌。图 1 为常温、400 °C

和 800 °C 水冷却后花岗岩的 X 射线衍射图谱,样品主要矿物成分为长石、石英、云母及少量角闪石,其中长石以钙钠长石为主,有部分钾长石。对比各温度水冷却后的花岗岩岩样衍射图谱,各衍射峰对应的衍射角大体相同,说明所含主要矿物种类未发生改变。通过 K 值法^[26],根据式 (1) 计算不同温度水冷却岩样各主要矿物成分相对含量(见表 2)。

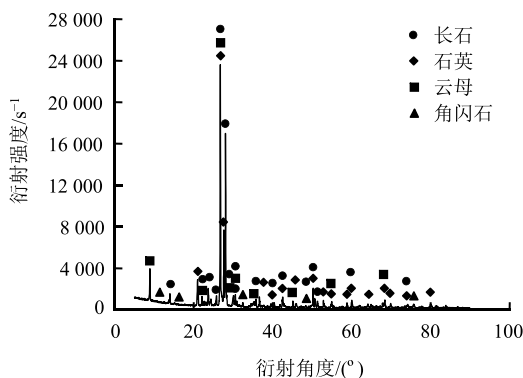
$$W_X = \frac{I_X}{K_A^X \sum_{i=A}^N \frac{I_i}{K_A^i}} \quad (1)$$



(a) 常温



(b) $T = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $T = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$

图 1 岩样在不同温度下的 X 射线衍射图谱
Fig.1 X-ray diffraction patterns of rock samples at different temperatures

表 2 不同温度水冷却岩样主要矿物成分
相对含量 (单位: %)

Table 2 Relative contents of the main mineral components
at different temperatures (unit: %)

温度/℃	长石	石英	云母	角闪石
常温	59.5	24.3	13.8	2.4
400	58.2	25.1	14.1	2.6
800	54.6	25.9	15.6	3.9

式中: W_x 为某物相 X 的相对含量; I_x 为某物相 X 的衍射强度; A 为 N 个相中被选定为内标相的物相名称; K_A^x 为某物相 X 与内标相 A 之间 RIR 值的比。

由表 2 可知, 随加热温度升高, 岩样中矿物石英、云母、角闪石相对含量不断增大, 常温时分别占比为 24.3%、13.8%、2.4%, 800 °C 时分别占比为 25.9%、15.6%、3.9%。这主要是由于石英在 573 °C 附近发生 α 相转变 β 相^[27], 但在温度降低后, 相变逆转, 而云母、角闪石耐高温性能较好, 长石在整个样品中处于主体成分, 随温度增加其相对含量不断减小, 尤其 800 °C 时长石的差热曲线出现吸热谷^[28], 发生多晶形转变, 因而相对含量波动性较大。

图 2 为不同温度花岗岩水冷却的表观形貌。岩样的颜色随着温度增加逐渐变浅, 温度较低 (≤ 200 °C) 时岩样整体呈灰褐色, 黑色斑点 (黑云母) 与周遭环境区分不明显。在 400 °C 以后岩样整体颜色明显变浅, 呈现出灰白色。经 XRD 分析, 钙钠长石在样品中是主体成分, 且随着温度的升高, 其最大衍射强度明显增加。800 °C 岩样的衍射强度比 400 °C 时增加了将近 1 倍, 比常温时增加了 2 倍。一方面, 由于高温, 岩样中 Ca 与 O_2 发生氧化反应生成 CaO (颜色浅白); 另一方面, CaO 与水、二氧化碳接触进一步生成 $CaCO_3$ (白色), 导致岩样颜色变浅。此时试验样品表面有局部浅棕黄色斑点呈现, 这是由于在高温作用下有部分含铁物质发生了氧化反应或失去结晶水, 生成棕黄色物质。

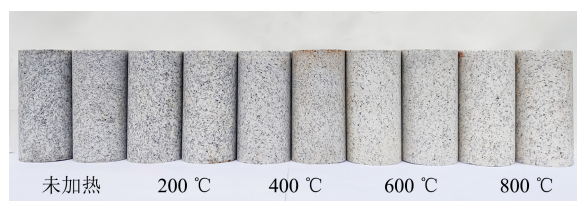


图 2 不同高温加热水冷却处理样品图
Fig.2 Water-cooled rock samples

600 °C 后岩样表面粗糙, 出现肉眼可见凹坑和微小裂纹, 温度越高, 岩样表面损伤越显著, 因此, 可通过表观颜色变化大致判断岩样经历的加热温度

范围。同组样品之间互相敲击, 加热温度较低 (≤ 200 °C) 时岩样音色浊重, 400 °C 时岩样浊重声减弱, 600 °C 以后岩样音色较为清脆响亮。这是由于随温度升高, 岩样各主要矿物成分衍射峰强度不断增大, 在衍射角 $2\theta = 26.5^\circ$ 附近时各温度点最大衍射峰强度分别为 16 585、19 278、23 807 s^{-1} 。衍射图谱曲线低峰尖刺部分减少, 说明主要矿物成分衍射强度受杂质影响减小, 岩样内杂质随加热温度升高逐渐减少, 因而敲击声逐渐清脆。

3.1.2 不同温度岩样水冷却后物理参数变化

采用质量损失率、体积增长率和密度降低率分别表征水冷却后花岗岩质量、体积及密度的变化。损失率为高温水冷却后岩样质量减少量与原质量的百分比。体积增长率为高温水冷却后岩样体积增加量与原体积百分比。密度降低率为密度减小量与原密度百分比。高温水冷却前后的试样的物理力学参数见表 3。

高温水冷却岩样的质量损失率、体积增长率和密度降低率均随温度升高而增加, 如图 3 所示。与密度降低率、体积增长率相比, 岩样质量损失率变化幅度较小, 800 °C 水冷却岩样的质量损失率仅为 0.179%。由 XRD 分析可知, 800 °C 岩样的主要矿物成分并未发生变化, 其质量减小原因主要是由于试样内部的附着水、结合水逸出和蒸发以及部分胶结物的热解所导致^[29]。高温水冷却岩样的密度、体积变化随温度升高出现较大增长, 这是由于温度作用使试样内部微裂纹扩展导致体积增大。此外, 由于在 400~600 °C 之间存在石英相变^[27]温度点, α 相石英变为 β 相石英, 周边矿物晶体受到挤压导致裂隙进一步扩展, 试样体积膨胀率随加热温度显著增加, 从而使密度降低率增加, 花岗岩岩样整体致密性下降。

3.2 高温花岗岩水冷却后力学特性

图 4 为高温花岗岩水冷却后的单轴抗压强度和弹性模量随温度变化曲线。岩样的单轴抗压强度随着加热温度的升高呈线性降低。未进行加热处理的花岗岩峰值强度为 242.81 MPa, 在 200、400、600、800 °C 时分别为 205.35、165.08、127.11、98.05 MPa, 这与邵保平^[20]、朱振南^[22]等的试验结果一致。由于高温岩样遇水后形成的温度梯度较大, 短时间内受到较大热冲击力, 热应力破坏了颗粒间原有胶结, 导致岩样内产生较多微裂隙, 岩样整体致密性下降, 内部损伤加剧。

由不同岩样的全过程应力-应变曲线可获得高温水冷却岩样的平均弹性模量, 如图 4 所示。弹性

表 3 水冷却高温花岗岩物理力学试验参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of water-cooled rocks

编号	$T/^{\circ}\text{C}$	m_1/g	m_2/g	V_1/cm^3	V_2/cm^3	$\rho_1/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_2/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	UCS/MPa	E/GPa
W-1	室温	516.9	516.9	197.2	197.2	2.621 2	2.621 2	3 782	3 782	242.81	20.20
W-2	室温	519.7	519.7	198.4	198.4	2.619 5	2.619 5	3 756	3 756	227.36	19.24
W-3	室温	517.6	517.6	197.9	197.9	2.615 5	2.615 5	3 722	3 722	246.65	21.03
A1	200	516.4	516.3	196.7	202.1	2.625 3	2.554 7	3 757	3 324	205.36	13.79
A2	200	519.3	519.2	196.7	203.1	2.640 1	2.556 4	3 747	3 221	209.16	13.46
A3	200	515.0	514.8	197.0	201.8	2.614 2	2.551 0	3 771	3 237	203.62	12.93
B1	400	521.4	521.1	196.2	203.2	2.657 5	2.562 9	3 743	2 230	165.08	10.97
B2	400	514.1	513.7	195.9	202.4	2.624 3	2.537 1	3 726	2 183	190.36	11.31
B3	400	517.5	517.1	196.9	204.3	2.628 2	2.529 6	3 763	2 188	162.73	10.35
C1	600	518.2	517.4	197.6	207.9	2.622 5	2.488 7	3 752	869	125.31	5.63
C2	600	519.2	518.3	197.2	207.7	2.632 9	2.497 4	3 736	841	127.11	5.98
C3	600	518.3	517.5	198.7	207.5	2.608 5	2.494 0	3 759	916	130.16	7.14
D1	800	520.4	519.1	197.9	210.6	2.639 6	2.467 2	3 741	717	105.83	4.87
D2	800	525.8	524.3	199.7	213.5	2.632 9	2.462 4	3 765	721	98.05	4.32
D3	800	521.4	520.0	197.8	211.8	2.636 2	2.457 5	3 741	726	94.62	4.83

注：编号 W、A、B、C、D 分别表示常温以及 200、400、600、800 $^{\circ}\text{C}$ 岩样； m_1 、 V_1 、 ρ_1 、 v_1 分别为水冷却前岩样的质量、体积、密度、波速； m_2 、 V_2 、 ρ_2 、 v_2 分别为水冷却后岩样的质量、体积、密度、波速；UCS 为单轴抗压强度； E 为弹性模量。

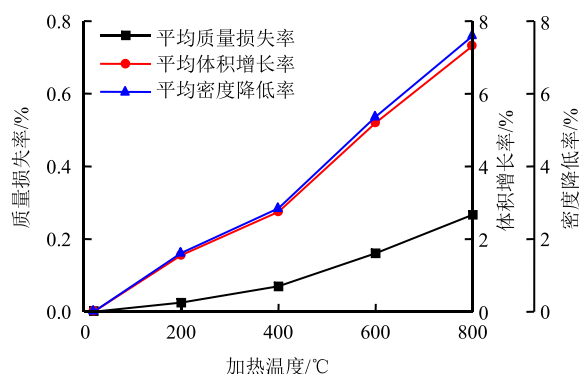


图 3 高温花岗岩水冷却后的质量、体积、密度随加热温度变化曲线

Fig.3 Variations of mass, volume, and density of water-cooled rocks as a function of temperature

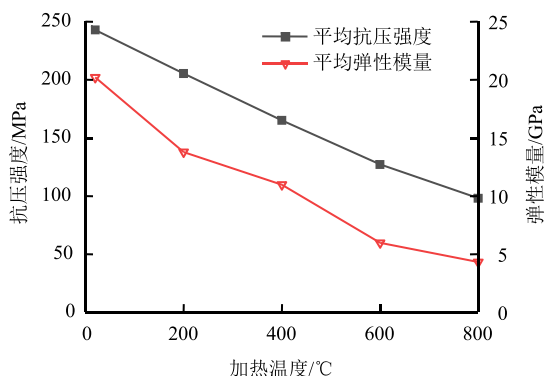
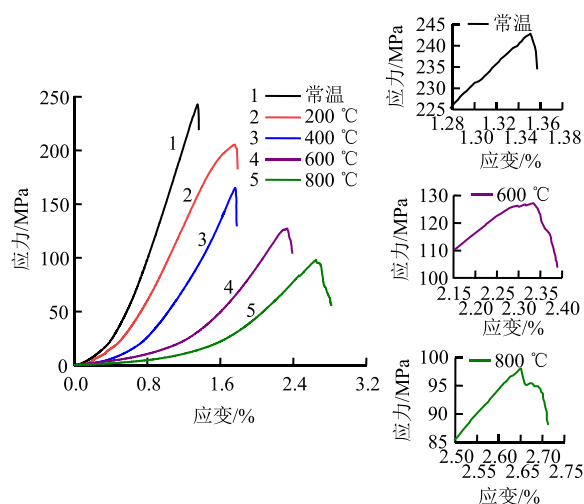


图 4 高温花岗岩水冷却后的抗压强度和弹性模量与温度关系曲线

Fig.4 Compressive strength and elastic modulus of water-cooled rocks as a function of temperature

后试样平均弹性模量与常温相比降低了约 78.6%。可见由于温度-水冷却作用改变了高温花岗岩在弹性阶段的变形性质。

不同加热温度花岗岩水冷却后应力-应变曲线如图 5 所示。可以看到，随着温度升高，非线性压密阶段呈上凹型，温度越高，则压密段对应的应变越大，说明随温度越高，岩石内部损伤加剧；在弹性阶段，曲线近似呈直线状态，斜率随温度升高逐渐减小，即岩样切线弹性模量不断减小；在 400~600 $^{\circ}\text{C}$ 岩样的压密段及峰值应变有显著增长。

图 5 高温花岗岩水冷却后的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of water-cooled granite

随着加热温度的升高 ($\geq 600^{\circ}\text{C}$)，由应力-应变曲线局部放大图可见，岩样破坏的突发性逐渐减弱，破坏呈渐进性，且在破坏前有明显前兆，伴随

模量随加热温度的升高不断降低，经历 800 $^{\circ}\text{C}$ 高温

有大量碎屑剥落。岩样峰值应变随温度升高不断增加, 常温花岗岩的峰值应变为 1.373%, 在 200、400、600、800 °C 时分别为 1.713%、2.128%、2.436%、2.893%, 尤其在 800 °C 时峰值应变达到常温岩样峰值应变的 2 倍。

随温度的升高, 热冲击导致岩样损伤加剧; 岩样中石英在 400~600 °C 相变^[27]引起岩样内部裂隙进一步扩展; 在 800 °C 时, 长石会发生多晶形转变^[28], 结构由晶态向非晶态的相转变, 导致损伤进一步加剧, 岩样受载破坏时变形量增大。

3.3 高温花岗岩水冷却后超声波特性

图 6 是高温花岗岩水冷却后平均峰值抗压强度与平均纵波波速的关系, 纵波波速随温度升高而降低。常温花岗岩平均纵波波速为 3 850 m/s, 峰值抗压强度为 242.81 MPa; 200 °C 时水冷却岩样的平均纵波波速为 3 327 m/s, 峰值抗压强度为 205.35 MPa, 波速衰减率和峰值抗压强度衰减率分别为 13.58%、15.43%; 400 °C 时水冷却岩样平均波速为 2 197 m/s, 峰值抗压强度为 165.08 MPa。相较加热温度为 200 °C 时, 400~600 °C 高温水冷却岩样的波速、强度衰减率快速增长, 400 °C 时衰减率分别为 42.93%、32.01%, 600 °C 时衰减率分别为 77.06%、48.12%。温度继续增加, 则波速衰减率增幅降低。说明 200~600 °C 温度范围内岩样内部由于物理化学作用损伤更为剧烈, 而超过 600 °C 后损伤幅度降低。

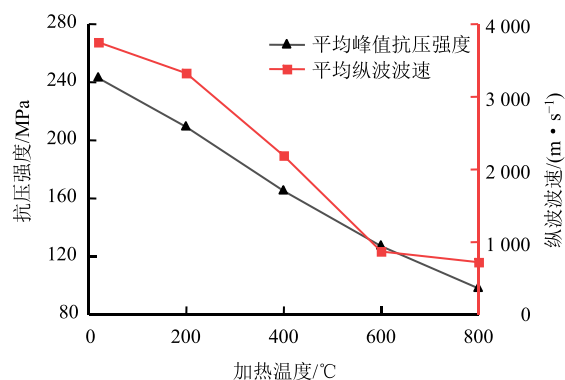


图 6 高温花岗岩水冷却后平均峰值抗压强度与平均纵波波速的关系

Fig.6 Relationship between average peak compressive strength and average wave velocity of high-temperature granite after water-cooling

图 7 为高温花岗岩水冷却后的超声波频谱图。由图可以看到, 随温度升高岩样频谱图幅度与横坐标所围成的面积逐渐减小, 说明高温水冷却作用使岩样内部损伤增加, 声波在多个缺陷面发生反射和折射时伴随有能量散失^[30], 导致声波在传播过程中整体能量耗散增多。常温花岗岩岩样的平均波幅为 660 dB, 200 °C 高温遇水后岩样的主峰幅度降低至 450 dB 附近, 说明岩样内部空洞、裂隙数目增多, 岩样整体性受到破坏, 声波只能绕过空洞或裂隙通过固体传播到接收换能器, 因此, 首波幅度减小。

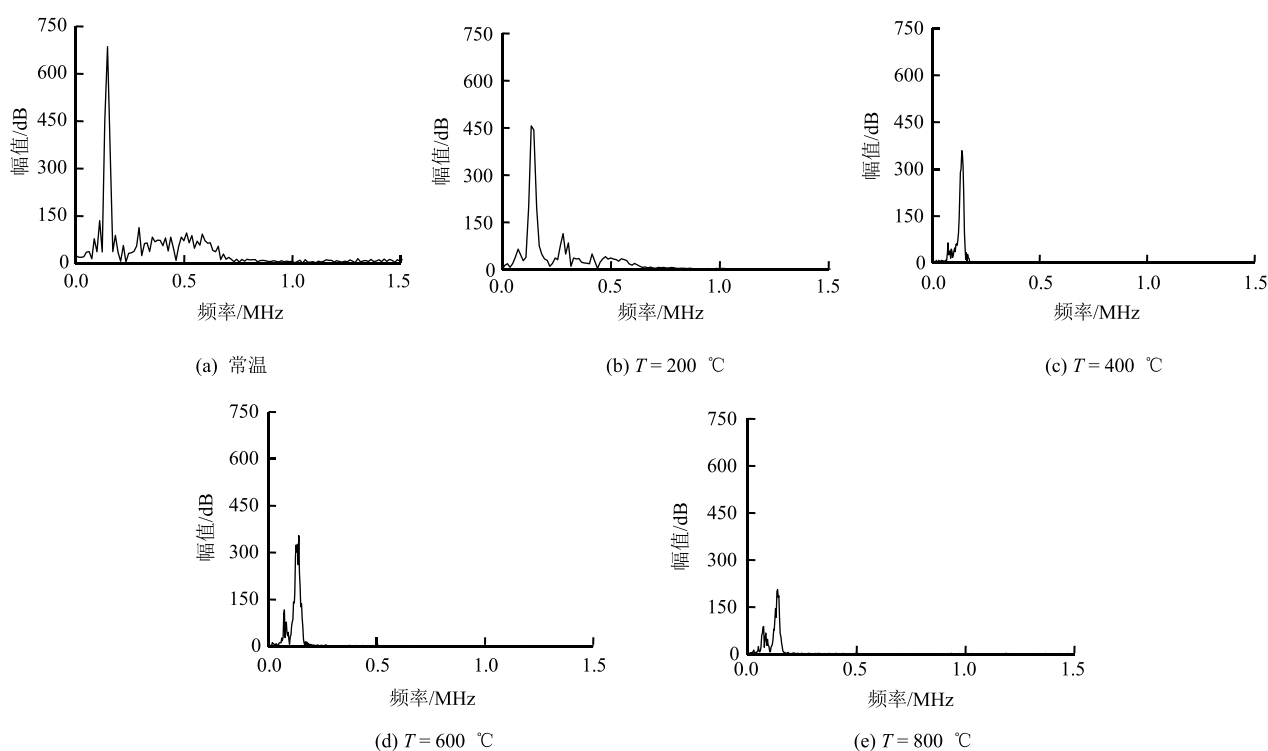


图 7 高温花岗岩水冷却后超声波频谱图

Fig.7 Ultrasonic spectrums of water-cooled granite

相较于 200 ℃ 时, 400 ℃ 岩样的主峰幅度为 350 dB 左右, 频谱图形貌变化明显, 低频部分峰值不明显, 说明花岗岩内部裂隙增多, 隐微裂隙开展, 整体致密性下降。600 ℃ 时主频进一步降低, 主峰前的次峰明显, 说明岩样内部产生了较大缺陷界面, 声波在缺陷面处发生波形转变、叠加和不同方位的分散, 造成接收器所接收到的波形紊乱^[31]。除热冲击加剧导致岩样内部损伤破裂加剧外, 由于岩样石英含量较多, 在 400~600 ℃ 石英由 α 相变为 β 相^[27], 相变导致晶体间结构作用弱化, 加剧了岩样内部缺陷面的生成。800 ℃ 水冷却岩样的主频峰值降为 200 dB 左右。由于花岗岩中的长石在 700~900 ℃ 会发生多晶形转变^[28], 晶体间结构由晶态向非晶态相转变, 这也加剧了岩石内部损伤的进一步发展。

3.4 高温花岗岩水冷却岩样的压缩破坏特征及微观解释

花岗岩是典型的脆性岩石, 在常温下发生典型的脆性破坏。随着加热温度的升高, 其脆性破坏特征逐渐减弱。图 8 为不同温度水冷却花岗岩的单轴压缩破坏形态。从图中可以看出, 常温岩样破坏整体为张剪复合破坏, 破坏呈突发性, 岩样破碎呈块状; 加热温度为 400 ℃ 时, 岩样破坏以剪切破坏为主, 岩样碎裂程度增加; 加热温度为 600、800 ℃ 时岩样破坏主要为剪切破坏, 破坏时岩样表面出现剥落现象, 有明显破坏前兆, 破坏岩样呈碎块状, 并伴有大量细碎岩屑。表 4 列出了岩样破坏时的宏观破裂模式及断口的微观观察结果。

经显微镜放大 200 倍的观测破坏表面如图 9 所示。利用 Matlab 对高温花岗岩水冷却后破裂面偏光显微观测图进行二值化处理后, 统计了裂纹面积的占比, 未加热岩样破裂面裂纹面积占比为 6.32%, 在 200、400、600、800 ℃ 时裂纹面积占比分别为 9.02%、10.10%、11.43%、13.98%。可见随加热温度升高, 岩样破裂面裂纹不断增多。图 9(a)、9(b) 中常温岩样破裂面较为平整光滑; 加热温度为 200 ℃ 时, 岩样破裂面增加, 岩样表面出现明显的裂纹, 显微观察可见沿晶断裂裂纹(见图 9(c)、9(d)), 破裂面平整度增加。这是由于温度及热冲击作用使矿物颗粒间胶结黏结力减弱。加热温度为 400 ℃ 时, 显微观察可见碎裂面表面粗糙, 多见沿晶裂纹和穿晶裂纹(见图 9(e)、9(f))。由于 400 ℃ 时岩样内部产生了较多晶内裂纹, 岩样内部裂隙增多, 在荷载作用下微裂纹扩展贯通, 形成较多破裂面, 这也与该温度下超声波波速衰减幅度增大相一致。加热温度为 600、800 ℃ 时岩样破裂面呈现肉眼可见的

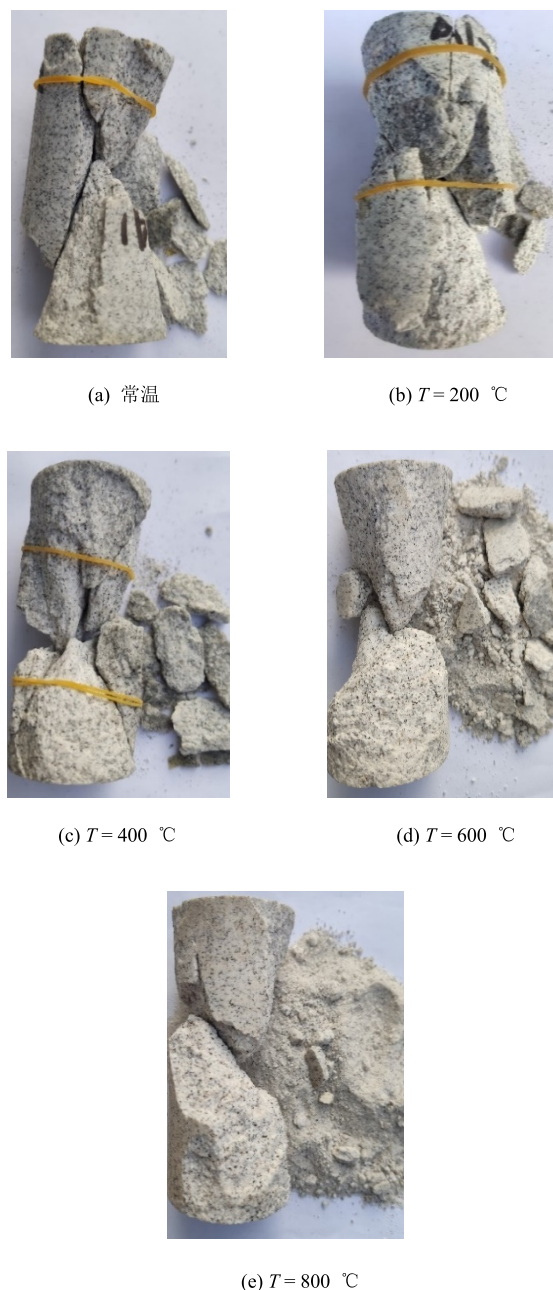
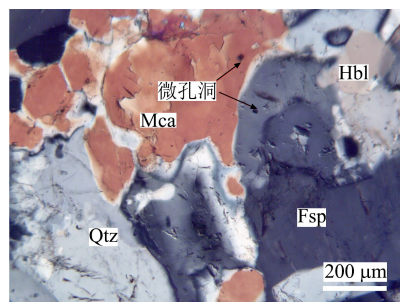


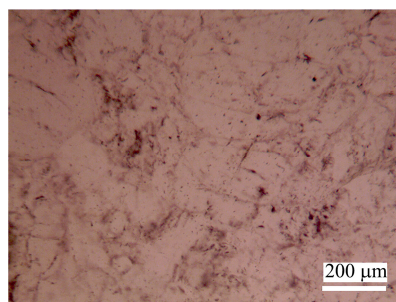
图 8 水冷却高温花岗岩加载破坏形态
Fig.8 Failure modes of water-cooled granite

表 4 水冷却高温花岗岩加载断口微观与宏观破坏特性对比
Table 4 Microscopic and macroscopic failure characteristics of loaded water-cooled granite

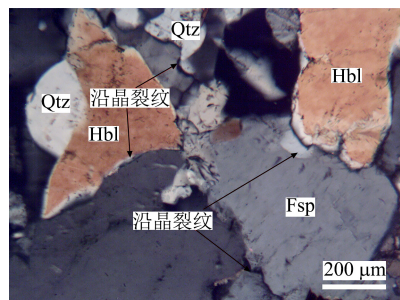
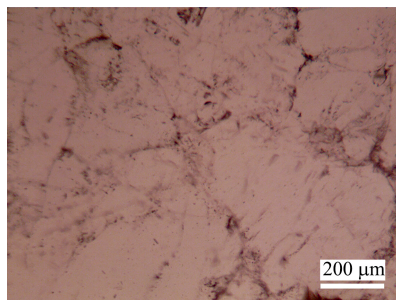
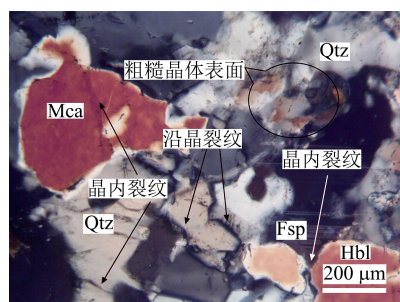
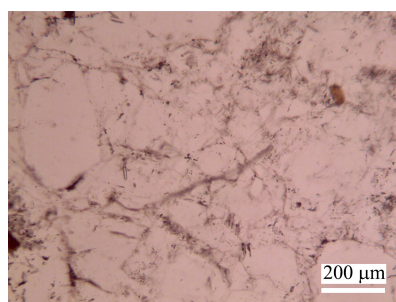
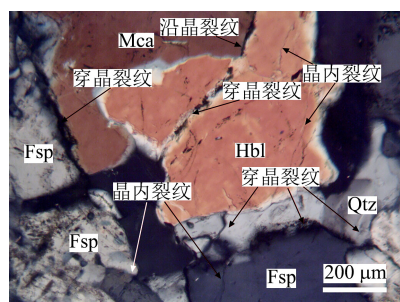
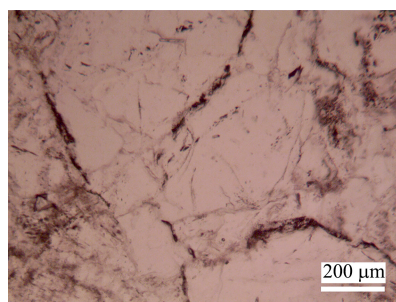
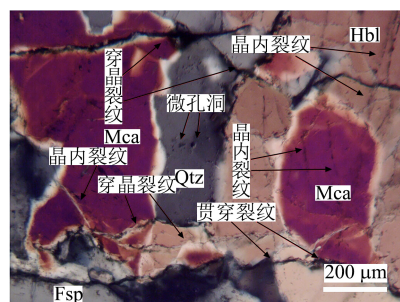
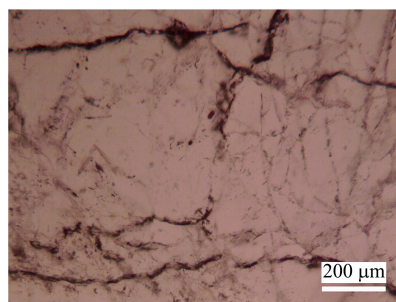
温度/℃	宏观破坏形态	破坏模式	微观破裂形式	破坏机制
常温	张性劈裂 (劈裂面大)	突发失稳	微空洞断裂	张剪复合破坏
200	张性劈裂 (劈裂面小)	突发失稳	沿晶断裂	张剪复合破坏
400	轴向劈裂 (沿轴心)	准突发失稳	晶内断裂	剪张复合破坏
600	锥裂 (破坏面沙粒状)	渐进失稳	穿晶断裂	以剪为主破坏
800	锥裂 (破坏面粉状)	渐进失稳	穿晶断裂	以剪为主破坏



(a) 常温 (正交偏光)



(b) 常温 (单偏光)

(c) $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (正交偏光)(d) $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (单偏光)(e) $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (正交偏光)(f) $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (单偏光)(g) $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (正交偏光)(h) $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (单偏光)(i) $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (正交偏光)(j) $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (单偏光)

注：Qtz 为石英，Fsp 为长石，Mca 为云母，Hbl 为角闪石。

图 9 高温花岗岩水冷却后破裂面显微镜观测图

Fig.9 Microscopic observations of the fracture surfaces of high-temperature granite after water-cooling

台阶状条纹, 见图 9(g)~9(j), 放大 200 倍观察可见破裂面有大量微裂纹和凹坑, 晶界裂纹连结扩展为穿晶裂纹。这也与石英在 573 °C 附近发生相变及长石在 700~900 °C 出现多晶形转变有关。从破裂面可观察到矿物发生氧化反应生成的淡棕黄色物质, 此时岩样酥碎, 破碎块粉末状居多。

4 结 论

(1) 随温度升高, 高温花岗岩水冷却后的单轴抗压强度峰值不断降低, 峰值应变不断增大, 弹性模量不断降低。加热温度为 800 °C 时水冷却岩样的平均弹性模量与常温岩样相比降低了约 78.6%。随温度增加, 高温水冷却岩样破坏由突发性破坏向渐进破坏转变。

(2) 高温花岗岩水冷却后内部矿物成分含量发生一定变化, 但主要矿物种类未发生改变。加热温度超过 400 °C 后, 岩样中钙钠长石的 Ca 与 O₂ 发生氧化反应生成 CaO, CaO 与水、二氧化碳接触进一步生成 CaCO₃, 使岩样整体颜色明显变浅, 呈现出灰白色。

(3) 高温花岗岩水冷却后的质量损失率、体积增长率和密度降低率均随温度升高而增加, 波速随温度升高而降低; 在 400~600 °C 之间水冷却岩样体积膨胀率和密度降低率随温度升高显著增加; 600~800 °C 范围内水冷却岩样的波速衰减率幅度减小。

(4) 常温岩样破坏整体为张剪复合破坏, 破坏呈突发性, 岩样破碎呈块状。温度为 400 °C 时, 水冷却岩样的破坏呈现以剪切破坏为主, 岩样碎裂程度增加。温度为 600、800 °C 时水冷却岩样破坏主要为剪切破坏, 有明显破坏前兆, 破坏岩样呈碎块状。温度梯度越大, 则热冲击导致的穿晶裂纹越多, 导致岩样的破坏时带有大量粉末状碎屑。

参 考 文 献

- [1] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
WANG Gui-ling, LIU Yan-guang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 1-9.
- [2] 毛翔, 国殿斌, 罗璐, 等. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J]. 地质论评, 2019, 65(6): 1462-1472.
MAO Xiang, GUO Dian-bin, LUO Lu, et al. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background[J]. *Geological Review*, 2019, 65(6): 1462-1472.
- [3] 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.
- [4] 陈希节, 负晓瑞, 雷敏, 等. 青海共和盆地中三叠世花岗岩组合岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 2020, 36(10): 3152-3170.
CHEN Xi-jie, YUN Xiao-rui, LEI Min, et al. Petrogenesis of middle triassic granite association in the Gonghe basin, Qinghai: constraints from geochemistry, U-Pb ages and Hf isotopic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(10): 3152-3170.
- [5] LEI Z H, ZHANG Y J, ZHANG S Q, et al. Electricity generation from a three-horizontal-well enhanced geothermal system in the Qiabuqia geothermal field, China: slickwater fracturing treatments for different reservoir scenarios[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 65-83.
- [6] 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 Fang-chao, TANG Chun-an. Overview of enhanced geothermal system(EGS) based on excavation in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 185-193.
- [7] 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): 2233-2240.
ZHAO Yi-qing, WU Chang-gui, JIN Ai-bing, et al. Experimental study of sandstone microstructure and mechanical properties under high temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2233-2240.
- [8] 尹乾, 靖洪文, 苏海健, 等. 高温后花岗岩断裂特性的加载速率效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 597-603.
YIN Qian, JING Hong-wen, SU Hai-jian, et al. Loading rate effect on fracture properties of granite after high temperature[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2015, 44(4): 597-603.
- [9] 支乐鹏, 许金余, 刘志群, 等. 高温后花岗岩冲击破坏行为及波动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 135-142.

- ZHI Le-peng, XU Jin-yu, LIU Zhi-qun, et al. Research on impacting failure behavior and fluctuation characteristics of granite exposed to high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(1): 135-142.
- [10] CHEN S W, YANG C H, WANG G B. Evolution of thermal damage and permeability of Beishan granite[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2017, 110: 1533-1542.
- [11] 张强勇, 张龙云, 向文, 等. 考虑温度效应的片麻状花岗岩三轴蠕变试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2507-2514.
- ZHANG Qiang-yong, ZHANG Long-yun, XIANG Wen, et al. Triaxial creep test of gneissic granite considering thermal effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(9): 2507-2514.
- [12] 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(1): 180-197.
- [13] 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 Ya-yong, WEI Kai, ZHOU Jia-qing, 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.
- [14] SHAO S S, RANJITH P G, WASANTHA P L P, et al. Experimental and numerical studies on the mechanical behavior of Australian Strathbogie granite at high temperatures: an application to geothermal energy[J]. **Geothermics**, 2015, 54(3): 96-108.
- [15] 吴刚, 翟松韬, 王宇. 高温下花岗岩的细观结构与声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 351-356.
- WU Gang, ZHAI Song-tao, WANG Yu. Research on characteristics of mesostructured and acoustic emission of granite under high temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Suppl.1): 351-356.
- [16] 张帆, 胡维, 郭翰群, 等. 热处理后花岗岩纳米压痕试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 235-243.
- ZHANG Fan, HU Wei, GUO Han-qun, et al. Nanoindentation tests on granite after heat treatment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl.1): 235-243.
- [17] 靳佩桦, 胡耀青, 邵继喜, 等. 高温花岗岩遇水冷却后孔隙结构及渗透性研究[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(4): 478-484.
- JIN Pei-hua, HU Yao-qing, SHAO Ji-xi, et al. Study on pore structure and permeability of granite subjected to heating and water quenching[J]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 2019, 50(4): 478-484.
- [18] SHAO S S, WASANTHA P L P, RANJITH P G, et al. Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 70(9): 381-387.
- [19] ZHANG F, ZHAO J, HU D, et al. Laboratory investigation on physical and mechanical properties of granite after heating and water-cooling treatment[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(3): 677-694.
- [20] 邵保平, 赵阳升. 600 °C 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): 893-898.
- XI Bao-ping, ZHAO Yang-sheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600 °C[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 893-898.
- [21] 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(1): 44-59.
- [22] 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 Zhen-nan, TIAN Hong, DONG Nan-nan, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of heat-treated granite by water cooling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl.2): 169-176.
- [23] 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 Yao-liang, YU Jin, GAO Hai-dong, 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.
- [24] TODD T P. Effect of cracks on elastic properties of low porosity rocks[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1973.

- [25] CHOI N S, KIM T W, RHEE K Y. Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic-loading[J]. **NDT & E International**, 2005, 38(4): 268-274.
- [26] 黄继武, 李周. 多晶材料 X 射线衍射——实验原理、方法与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 95-116.
HUANG Ji-wu, LI Zhou. X-ray diffraction of polycrystalline materials-experimental principle, method and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 95-116.
- [27] GE Zhen-long, SUN Qiang. Acoustic emission(AE) characteristics of granite after heating and cooling cycles[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2018, 200(9): 418-429.
- [28] 黄伯龄. 矿物差热分析鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 510-511.
HUANG Bo-ling. Mineral differential thermal analysis identification manual[M]. Beijing: Science Press, 1987: 510-511.
- [29] 吴阳春, 邵保平, 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 Yang-chun, XI Bao-ping, 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.
- [30] 赵明阶, 徐蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 720-722.
ZHAO Ming-jie, XU Rong. The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(6): 720-722.
- [31] 林莉, 李喜孟. 超声波频谱分析技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 126-127.
LIN Li, LI Xi-meng. Ultrasonic spectrum analysis technology and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 126-127.

上接第 1567 页

《岩土力学》2020 年第 4 期被 EI 收录论文 (39 篇, 收录率 100%) (2)

序号	论文题名	作者	页码
21	考虑接缝影响的地下综合管廊振动台模型试验	冯立, 丁选明, 王成龙, 等	1295—1304
22	盐岩三轴间隔疲劳特性试验研究	李宗泽, 姜德义, 范金洋, 等	1305—1312
23	模袋袖阀管压密注浆的注浆压力理论计算方法研究	张浩, 施成华, 彭立敏, 等	1313—1322
24	碎屑流高风险区桩群防护结构优化布局研究	王东坡, 李沁泽, 毕钰璋, 等	1323—1328
25	线性卸荷作用下软土超孔隙水压力变化规律分析	师旭超, 孙运德	1333—1338
26	微型钢管砂浆复合桩在土体中稳定性计算	朱彦鹏, 严紫豪, 朱轶凡	1339—1346
27	锦屏一级水电站工程岩体对穿声波与单孔声波关联性探讨	杨静熙, 黄书岭, 刘忠绪	1347—1356
28	高地应力硬脆性围岩开挖损伤区时效性扩展案例分析——特征与机制	杨艳霜, 周辉, 梅松华, 等	1357—1365
29	盾构俯仰角变化对盾构-土相互作用影响研究	沈翔, 袁大军	1366—1376
30	土遗址全长黏结式锚固系统动力响应解析方法	芦苇, 赵冬, 李东波, 等	1377—1387
31	橡胶-粉土轻质混合土中管道动力响应特性	周恩全, 宗之鑫, 王琼, 等	1388—1395
32	优势流入参与坡体变形关系研究及应用	黄晓虎, 易武, 黄海峰, 等	1396—1403
33	浅层地基上管道轴向运动的阻力研究	任宇晓, 闫玥, 付登锋	1404—1411
34	非均质黏土地层隧道开挖面稳定运动单元上限有限元分析	杨峰, 何诗华, 吴遥杰, 等	1412—1419
35	基于偏振特性的下孔法剪切波到时判别问题探讨	苏杰, 周正华, 李小军, 等	1420—1428
36	弹性静力学问题的边界积分形式的数值流形法	聂治豹, 郑宏, 万涛, 等	1429—1436
37	采用复合单元法模拟裂隙多孔介质变饱和和流动	侯晓萍, 陈胜宏	1437—1446
38	基于岩梁-块体理论的巷道软弱层直接顶板破坏形式研究	陈虎, 叶义成, 王其虎, 等	1447—1454
39	干耦合超声波检测及波初至的自动拾取	刘媛, 马祥华, 刘洋, 等	1455—1464