

文章编号: 1673-3193(2024)03-0402-09

高温热处理对花岗岩巴西劈裂裂纹萌生与破坏特征的影响

杨哲懿¹, 武晋文¹, 邱永锋¹, 宋高莹¹, 宇文惠鑫², 李海涛¹

(1. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051; 2. 北京铁路公安处, 北京 100055)

摘要: 为研究高温对劈裂裂纹产生、扩展和贯通过程的影响, 对25~1 000 °C热处理后的花岗岩开展巴西劈裂实验, 采用数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)跟踪分析了试样在劈裂过程中的主应变场演化。研究表明: 1) 随着热处理温度升高, 花岗岩劈裂破坏后宏观断口处弯曲程度加剧, 破坏模式由拉伸破坏变为拉剪混合破坏。2) 不同高温劈裂条件下, 花岗岩总体经历了弹性-塑性-破坏阶段。25 °C时, 试样发生脆性破坏, 塑性变形和破坏阶段极短; 100~500 °C时, 主应变在塑性阶段内明显累积, 破坏阶段很短, 仍为脆性断裂; 600~1 000 °C时, 破坏阶段明显, 失效模式转变为延性破坏。3) 随着温度升高, 花岗岩延性逐渐增大, 端部效应减弱, 弹塑性过渡点 P_{E-F} 相应的荷载水平线性降低。

关键词: 花岗岩; 高温; 巴西劈裂; 数字图像相关技术; 裂纹萌生

中图分类号: TU45

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.03.018

引用格式: 杨哲懿, 武晋文, 邱永锋, 等. 高温热处理对花岗岩巴西劈裂裂纹萌生与破坏特征的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(3):402-410.

YANG Zheyi, WU Jinwen, QIU Yongfeng, et al. Effect of high temperature heat treatment on initiation and failure characteristics of brazilian crack in granite [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(3):402-410.

Effect of High Temperature Heat Treatment on Initiation and Failure Characteristics of Brazilian Crack in Granite

YANG Zheyi¹, WU Jinwen¹, QIU Yongfeng¹, SONG Gaoying¹, YUWEN Huixin², LI Haitao¹

(1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Beijing Railway Public Security Department, Beijing 100055, China)

Abstract: In order to study the influence of high temperature on crack generation, propagation and through-process, the Brazilian splitting test was carried out on granite treated at 25–1 000 °C, and the evolution of the principal strain field of the sample in the splitting process was tracked and analyzed by digital image correlation (DIC), and the results showed that: 1) With the heat treatment temperature increases, the degree of bending at the macroscopic fault after granite splitting failure intensifies, and the failure mode changes from tensile failure to tensile and shear mixed failure. 2) Under different high-temperature splitting conditions, granite generally underwent the elastic-plastic-failure stage. At 25 °C, the specimen undergoes brittle failure, plastic deformation and failure stage is extremely short; at 100–500 °C, the main

收稿日期: 2023-06-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51504220)

作者简介: 杨哲懿(1997—), 男, 硕士生, 主要从事岩石力学方面的研究。

通信作者: 武晋文(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: wujinwen1982@163.com。

strain accumulates significantly in the plastic stage, and the failure stage is very short, and it is still brittle fracture; at 600–1 000 °C, the failure stage is obvious, and the failure mode changes to ductile failure. 3) With the increase of temperature, the brittleness of granite weakens, the ductility of granite gradually enhances, the Y-shaped rupture disappears, the corresponding load level of PE-F at the elastoplastic transition point decreases linearly.

Key words: granite; high temperature; Brazilian splitting; digital image correlation technology; crack initiation

0 引言

增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)运行过程中,热储岩体温度逐渐降低,由热应力造成的裂隙迅速发育,特别是拉应力作用区域的裂隙表现更为突出,较大的拉应力极易使岩石发生拉伸破坏,进而导致EGS岩体稳定性降低。花岗岩是EGS重要的储层材料^[1],深入了解高温后花岗岩的拉破裂机理对于EGS的稳定性和安全性评估具有重要意义^[2]。

抗拉强度是岩石力学中描述岩石抗裂纹扩展能力的一项重要材料性能^[3]。EGS储层中岩体温度可达650 °C,高温下岩石内部会发生热破裂和相变等物理化学变化,地热层在开采、储运过程中不断冷却,热应力引起的裂缝会迅速发展,特别是拉应力区域的微裂缝更为突出,抗拉强度会逐渐降低^[4-7],最终导致EGS储层失稳和破裂。微裂纹的萌生、发育和扩展是导致岩石宏观破坏的主要控制源^[8],这个过程反映了高温岩体地质灾害的孕育和形成。很多学者采用理论分析、数值计算和破坏后裂纹的细观分析等方法,研究了热对岩石破裂特性的影响。

当实验对象为带有预制裂纹的试样时,在热应力和荷载共同作用下,含缺陷裂隙的尖端易发生应力集中,翼型裂纹首先从预制裂纹尖端处萌生,随后逐渐延伸至两侧加载端^[9],属于拉伸裂纹,当应力值到达阈值时,主裂纹贯穿岩样发生宏观破坏,同时扩展路径上新增了大量倾斜于加载径向的次生裂缝,主要为剪切裂纹,其出现时间晚于拉伸裂缝^[10-11]。此外,裂纹的起裂位置、扩展路径和破坏模式会受到岩石非均质性的显著影响。

近年来,DIC(Digital Image Correlation)技术的出现为检测拉伸断裂裂纹的萌生、破坏提供了一种更有效的手段。DIC是一种测量精度高,非接触的无损检测方法,可以检测裂纹萌生、破坏过程中任意时刻的应变场,能够实现全场实时观测^[12]。

Sharafisafa等^[13]研究了含不同大小块体的双岩的变形行为和裂缝发育趋势,发现大颗粒矿物在峰前加载阶段内的塑性变形发展明显,而小颗粒矿的塑性变形发展不明显。Aliabadian等^[14]通过DIC方法研究了常温下各向异性砂岩在巴西劈裂中裂纹的萌生和扩展,发现试样中部的应变随着加载持续积累,同时最大的拉伸应变集中逐渐向加载点发展。Munoz等^[15]进一步发现在损伤积累(荷载增加)过程中,应变局部化带逐渐清晰,新裂隙萌生前会有明显的前兆,可以观察到拉伸破坏过程中断裂过程区(FPZ)的演化规律^[16]。Ma等^[17]发现岩石发生破坏时,宏观裂纹沿损伤带扩展并连接其他应变局部化区域,试件最终通过宏观裂纹穿过圆盘而断裂。Kou等^[18]通过主应变的演化过程研究了层理角度对破坏裂纹的影响,结果发现相同温度下,随着层理倾角增大,破坏模式由拉伸破坏逐渐变为拉伸-剪切复合型破坏,特别当加载方向与层理垂直时,试样沿层理颗粒发生拉伸破坏。

以上关于劈裂裂纹萌生和扩展的研究主要分为两类:一类是高温条件对含预制裂纹试样破坏裂纹的萌生、扩展和破坏的影响,另一类是常温下非均质性(矿物颗粒粒度)和各向异性(层理)对于裂纹扩展路径的影响。关于基于DIC技术的高温热处理对花岗岩劈裂裂纹的萌生、扩展和破坏演化规律的影响有待更深入的研究。本文将利用DIC技术对完整的、非均质的花岗岩试样进行热处理(25~1 000 °C),并开展巴西劈裂实验,通过主应变的演化过程来分析高温对花岗岩破坏裂纹孕育、萌生和扩展过程的影响,从而为EGS的稳定性分析提供参考。

1 实验概况

1.1 实验样品及处理

实验样品为取自山东平邑的鲁灰花岗岩,表面完整无明显缺陷,密度为2.71 g/cm³。按照(ISRM)要求将花岗岩切割成尺寸为Φ50 mm×25 mm的圆

盘,端面平整度偏差控制在 ± 0.05 mm以内,表面平行度偏差控制在 0.02 mm以内,随后将岩样放入电加热炉内按 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率缓慢加热至预定温度:100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900和 $1\,000^\circ\text{C}$,加热完成后在炉内保温2 h以确保岩样内外温度均匀,然后打开炉门自然冷却至室温 25°C 后进行巴西劈裂实验。处理后的岩石样品如图1所示。



图1 高温后岩石样品

Fig. 1 The samples after high temperature

1.2 实验仪器和步骤

实验设备(图2)包括万能实验机和数字散斑测试系统,数字散斑测试采用ARAMIS的DIC系统,拍摄装置为双目CCD相机,相机分辨率为 $2\,448\text{ pixel}\times 2\,050\text{ pixel}$,物面分辨率为 $0.021\,95\text{ mm}/\text{pixel}$,位移精度为 0.01 pixel ,实际位移精度为 $0.000\,219\,5\text{ mm}$,子集大小 $M=25\text{ pixel}$,间距 $D=2\text{ pixel}$ 。

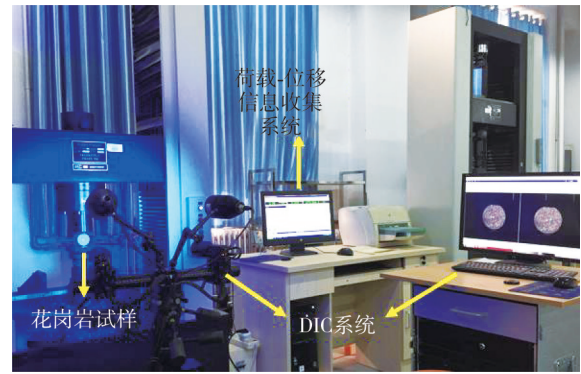


图2 数字散斑设备及万能试验机

Fig. 2 Digital speckle equipment and universal testing machine

实验步骤:1)对试样施加 50 N 的预压力;2)实验机以 $0.05\text{ mm}/\text{min}$ 的恒位移速率进行加载直至试样破坏,同时自动记录劈裂过程中的荷载、位移数据;3)开启DIC装置对劈裂实验进行监测,拍摄速率为 $1\text{ 帧}/\text{s}$ 。加载前在试件上下两端涂凡士林,以减小端部摩擦对实验的不利影响。

2 实验结果及分析

2.1 花岗岩劈裂过程及应变场演化

4个典型温度(25 , 300 , 600 和 $1\,000^\circ\text{C}$)的全场主应变云图演化规律如图3所示。

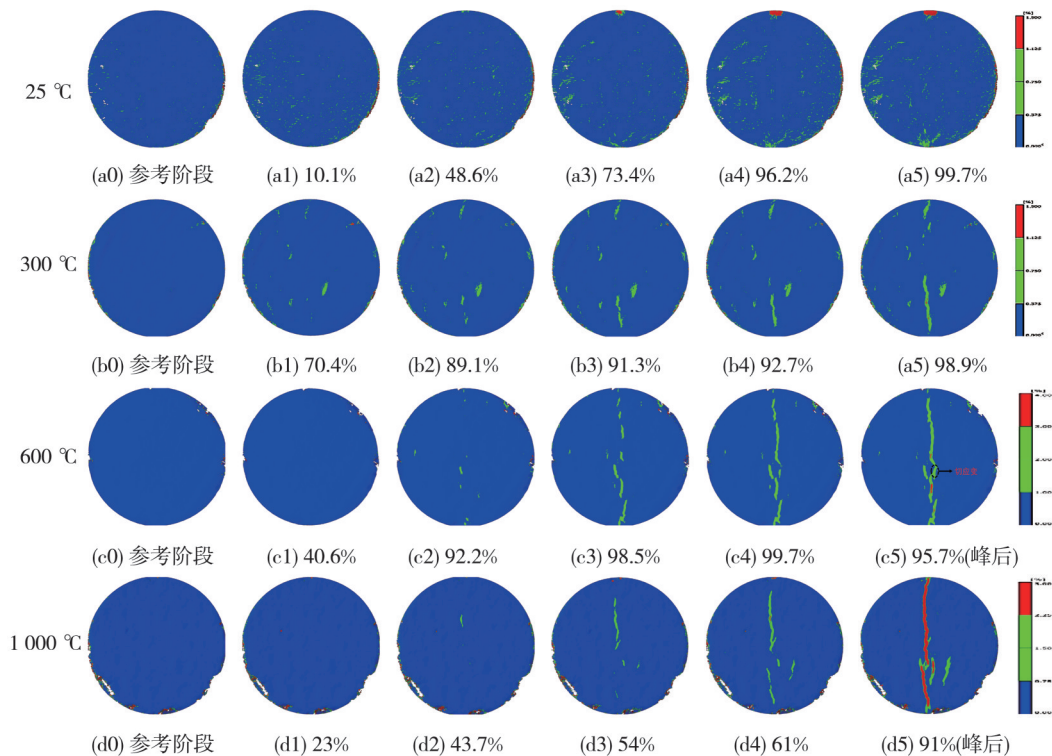


图3 不同温度下圆盘表面主应变场的演化

Fig. 3 Changes of principal strain field on the surface of the disk at different temperature

初始加载时,应变场分布较为均匀,表面无应变集中现象出现,随着荷载增大,试样表面逐渐出现局部应变集中区,外荷载接近峰值时,局部应变集中区在试样中心搭接,形成一条沿径向的高应变集中带,随即岩样沿着高应变集中带发生破坏。未经热处理(25℃),施加荷载为73.4% P_{max} (P_{max} 为峰值荷载)左右时,试样开始萌生少量微裂纹,端部表面附近逐渐出现局部应变集中区,荷载增至99.7% P_{max} 时,试样内部裂隙快速发育,两端应变集中区域范围增大,荷载达到峰值时岩样迅速破坏。常温下花岗岩为典型的脆性材料,失稳破坏过程极短,实验时设置DIC采样频率未能捕捉到破坏时刻的位移(应变)场信息。

热处理温度为300℃,外部施加荷载约为89.1% P_{max} 时,试样下部沿径向开始出现局部应力集中区(绿色区域),当荷载水平升至约91.3% P_{max} 时,局部应变集中区连接为带状应变集中区,同时试样上部也出现局部应变集中区,随着荷载持续增大,两端应变集中区向中心发育,约在试样中心处连接贯通,试样沿新形成的高应变集中带破坏。

热处理温度为600℃,外部荷载约为92.2% P_{max} 时,首个局部应变集中区出现在试样中心附近而非端部,加载方向上新生数条非连续的局部应变集中带,随着加载的持续进行,局部应变集中带发育后贯通,并在峰后形成了宏观破裂带。

热处理温度为1000℃,外部荷载约为43.7% P_{max} 时,圆盘试样中部出现明显的局部应变集中(如图3(d2)),而端部无应变集中出现;随着荷载增大,中心附近的局部应变集中区逐渐向端部扩展,最终形成一条贯穿试样表面的红色高应变带(约91% P_{max-a} , P_{max-a} 为峰后荷载)。

综上可知,随着热处理温度的不断升高,试样首个局部应变区出现的区域逐渐由试样端部移至试样中心。

2.2 基于DIC的劈裂破坏特征

不同温度下试样破坏的主裂缝形态存在明显差异,其中300,600和1000℃花岗岩的破坏形态最为典型。

图4(a)~图4(c)为试样破坏时刻的最大主应变等值线及实物图,图4(d)~图4(f)为相应宏观断口的局部放大图。值得注意的是,经过300℃

热处理后的试样仍具有较强脆性,破坏时间极短,DIC系统没有捕捉到破坏瞬间的图像,图4(a)为破坏发生前的最大主应变等值线。由图4(a)和图4(d)可知,300℃试样主要沿一条贯通的宏观断裂带发生拉伸破坏,岩样破坏失效时的主破裂带近似沿线性扩展。由图4(b)可知,600℃下荷载约95.7% P_{max-a} 时,试样表面存在一条明显的宏观主裂缝(应变云图不连续),观察图4(e)可知试样发生拉伸破坏时,主裂缝上存在少量倾斜于直径的红色高应变集中区(剪切破坏),破坏模式为拉剪混合破坏。高温后岩样内部穿晶断裂裂纹增多,部分新增裂纹在加载应力作用下沿晶粒边缘发育扩展,最终在晶粒尖端处形成偏离加载方向的高应变集中区,即剪切破坏^[19]。

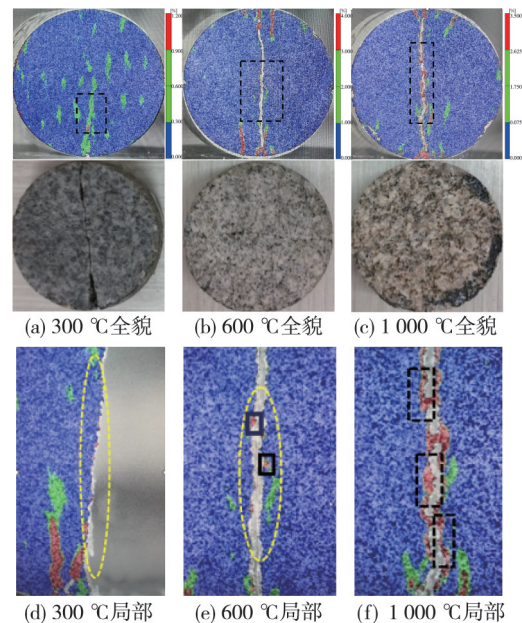


图4 典型的花岗岩破坏特征

Fig. 4 Typical granite failure characteristics

由图4(c)可知,1000℃下试样在荷载约91% P_{max-a} 时,试样表面才形成宏观主裂缝,与图3(d5)全场应变结果一致,此时主裂缝宽度较600℃增加,剪切破坏范围更大。高温导致试样内部的热裂纹密度及尺寸增大,更容易形成局部剪切滑移带,剪切裂纹继续扩展,导致岩样的完整性大幅度下降。此外,加热过程中花岗岩内部的自由水和结晶水不断散失逃逸,造成矿物晶格骨架破坏,矿物组分间胶结能变弱,使主拉应力区的破碎程度加剧(宏观破坏端口的弯曲程度加剧)^[20]。

从最终破坏结果来看(见图4(a)~图4(c)),

低于 300 °C 时试样受端部效应影响产生“Y”型破坏,这是因为荷载不断增大时,试样内部产生的等效应力也随之增加,试样与压头接触部分的原有微缺陷在受压时易造成应力集中并最先开裂,此时端点处受到拉伸破坏的同时也形成了剪切破坏。600~1 000 °C 时,劈裂完成后的岩样贴合紧密,无明显端部效应。随着温度升高,端部效应由于岩石强度降低和延性增强而减弱,破坏机制由脆性模式转变为塑性模式^[15]。故典型脆性岩石在进行巴西劈裂实验时,可以通过改变加载边界条件来消除端部效应^[21],此方法虽然可改善应力集中引起的破坏,但应力状态也发生了变化。

3 实验过程中的主应变演化

图 5 选择了 600 °C 中 06-3 号样品的主应变场的演化过程进行分析。因试样在峰后仍具备承载力,峰后破坏过程值得重点关注。在主裂缝带两侧选取有代表性的、清晰的 18 个子点(点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{18}$)的荷载/主应变-时间曲线进行分析,根据荷载/主应变-时间曲线在不同加载阶段的特征,可将试样的破坏过程分为 3 个阶段。

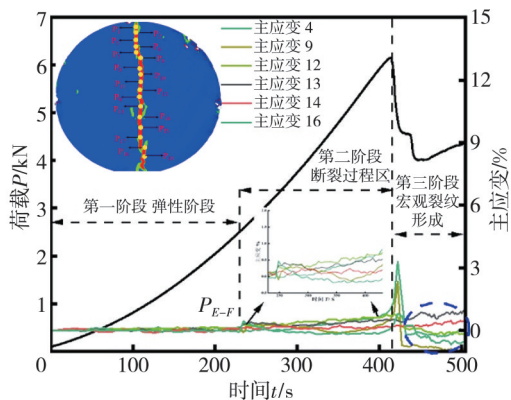


图 5 600 °C 时试样表面的荷载/应变-时间曲线

Fig. 5 Load-time curve and the strain-time curves for the selected points at 600 °C

第一阶段为弹性阶段(Stage I):从图 5 中可以看出,加载开始后至 229 s(40.6% P_{max})左右时,此阶段内各点的主应变曲线紧密结合,应变随着外载荷的增加大致呈线性增大(曲线斜率极低),各监测点处应变均在 $-0.11 \times 10^{-2} \sim 0.2 \times 10^{-2}$ 的范围内,结合主应变云图(图 3(c1))可知,此时试样表面几乎没有局部应变集中,岩石表现为完全弹性。

第二阶段为塑性阶段(Stage II):从 229 s 开始直至约 422 s,主应变的波动范围增大,各点主应

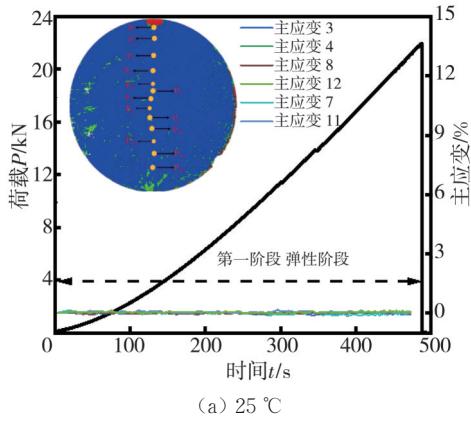
变曲线间具有明显的离散性(热处理后花岗岩内部出现大量微缺陷),缺陷边缘处在加载过程中产生了高应变集中,原有微破裂开始扩展,岩石的非均质性增强^[22]。各测点应变曲线斜率越来越大,但岩样表面未出现宏观裂纹,表明试样发生弹塑性混合变形^[23],进入应变积累阶段。

由图 5 中的局部放大图可知,点 P_4 处(中心)主应变在 422 s 首先突变,然后是点 P_9, P_{16} 处主应变依次发生突变,结合图 3(c4)可知,此时多个局部应变集中区迅速扩展连接,微裂纹在试样直径上扩展完全,FPZ 充分发育。点 $P_6, P_7, P_{11}, P_{13}, P_{14}, P_{15}$ 在峰值荷载前无明显应变积累,表明这些点处没有发生较大的塑性变形,可能为较硬矿物颗粒。

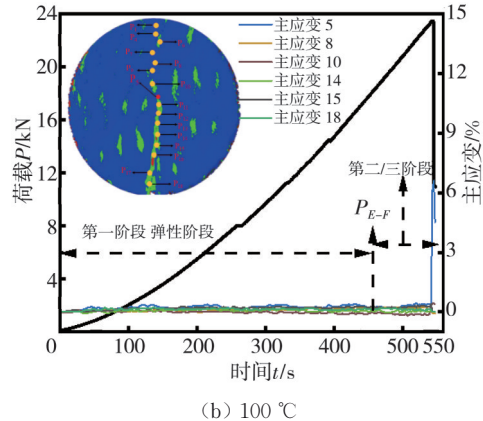
第三阶段为破坏阶段(Stage III):荷载约在 422 s 达到峰值,从峰值荷载开始至试样宏观破坏,主应变曲线斜率陡增。点 P_4, P_9, P_{16} 处主应变曲线依次出现峰值后骤降,试样发生劈裂破坏。主应变曲线的突变极值与峰值荷载并未同时出现,应变曲线峰值滞后于荷载峰值,合理解释为拉伸应力在裂纹起始至扩展贯通的过程中几乎恒定,试样在荷载峰值后才开始发生断裂^[21]。

图 6 为所有热处理温度下试样的荷载/主应变-时间曲线,当热处理温度为 200, 300, 400 和 500 °C 时,试样上端部附近的点 P_5, P_8, P_{15}, P_{14} 处主应变最先发生突变;热处理温度 700 °C 的试样上点 P_3, P_4, P_7 处,800 °C 的试样上点 P_4, P_7, P_{16} 处,900 °C 的试样上点 P_3, P_5, P_7 处,1 000 °C 的试样上点 P_6, P_8, P_9 处,主应变最先发生突变。应变最先发生突变的点就是拉破坏裂纹的起裂点。根据点分布位置可知,随着温度的升高,劈裂破坏的起裂位置逐渐向试样中心附近移动,与图 3 中应变集中区出现位置的变化规律相同。

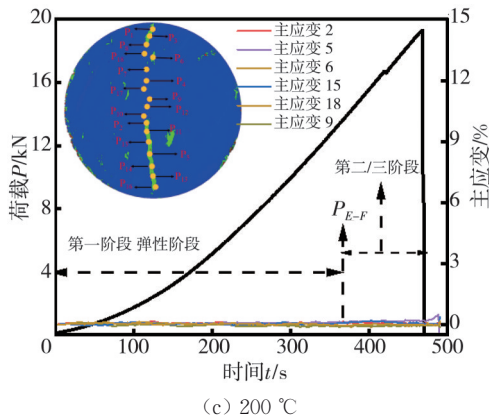
由图 6(a)可知,常温(25 °C)的主应变曲线仅表现出弹性阶段,无明显应变积累(主应变曲线迅速增大后跃变),可视为典型的脆性材料。100~500 °C 时,相较于 25 °C 主应变曲线出现了塑性变形阶段(主应变曲线斜率在塑性变形阶段逐渐增大),破坏阶段时间极短,主应变曲线无明显响应,如图 6(b)~图 6(f)所示。当热处理温度高于 500 °C 时,弹性、塑性和破坏阶段分界明显,如图 6(g)~图 6(j)所示。



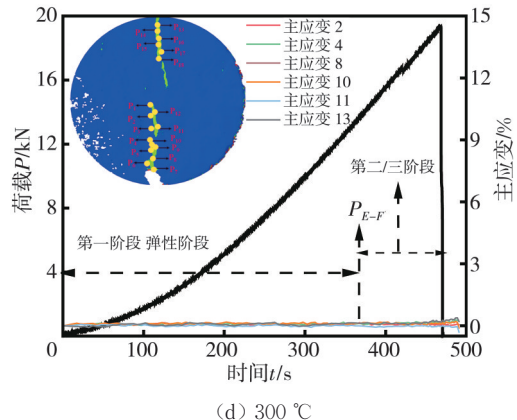
(a) 25 °C



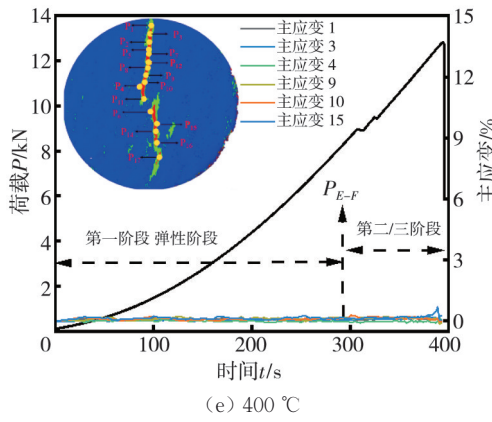
(b) 100 °C



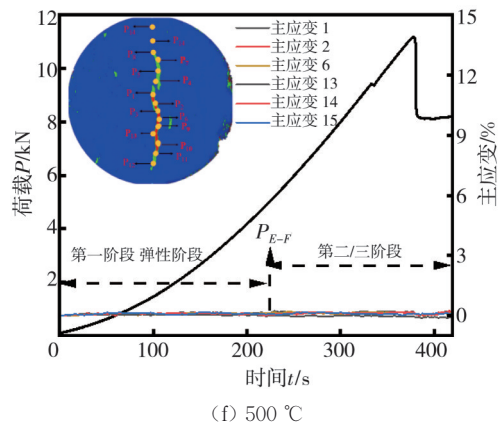
(c) 200 °C



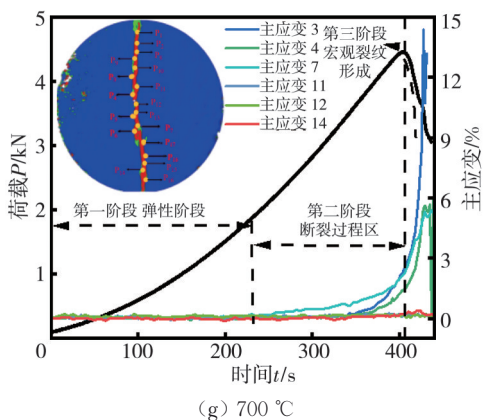
(d) 300 °C



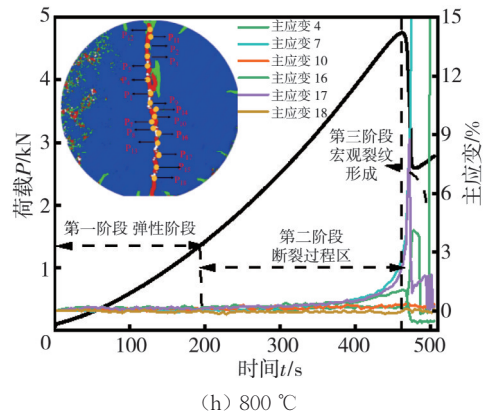
(e) 400 °C



(f) 500 °C



(g) 700 °C



(h) 800 °C

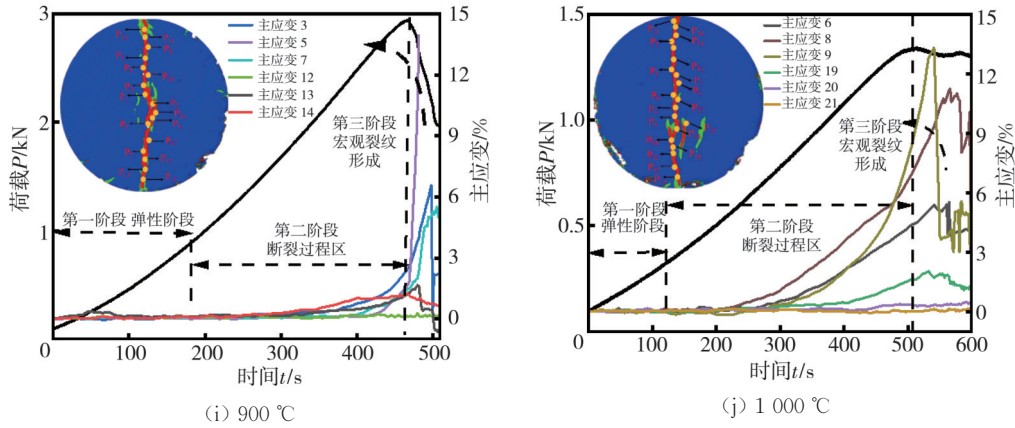


图6 不同热处理温度下最大主应变的阶段划分

Fig. 6 Phasing division of maximum principal strain at different heat treatment temperatures

从图6(g)~图6(j)中可以看到,高于600℃后,荷载-时间曲线在峰值荷载后下降趋势逐渐平缓,与之对应的主应变曲线(蓝色椭圆内)也随着时间呈波动式变化,试样仍在继续变形,延性明显增强,破坏模式由脆性断裂(突然崩裂)变为韧性断裂(撕裂破坏)。韧性断裂导致破坏阶段变慢,使我们可以更好地观察到峰后的岩石断裂过程。从图6中可以观察到明显的弹/塑性过渡点(P_{E-F}),且该过渡点随着热处理温度的升高逐渐前移,弹性阶段不断减小,塑性变形阶段增大。

图7所示为高温下弹塑性过渡点的荷载水平随温度的变化规律,荷载水平随着热处理温度的升高整体呈现为降低趋势。荷载水平和温度满足线性关系

$$Y = -7.702 \times 10^{-4}T + 0.939, \quad (1)$$

式中: Y 为不同温度下的弹塑性过渡点的荷载水平; T 为热处理温度。

由图6和图7可知,25℃样品仅有弹性阶段,点 P_{E-F} 的荷载水平无限接近峰值荷载。100℃时,点 P_{E-F} 的荷载水平约为80.5% P_{max} ,热处理温度升至300,600和1000℃时,点 P_{E-F} 荷载水平降至约70.8% P_{max} ,40.6% P_{max} 和23% P_{max} ,整体呈下降趋势。特别是当热处理温度为500~600℃时,点 P_{E-F} 的荷载水平急剧降低,由400℃时的65% P_{max} 骤降至45% P_{max} ~40.6% P_{max} ,表明岩石经过热处理后,高温使得岩样脆性减弱,弹性阶段迅速缩短,拉伸破坏模式由脆性断裂变为准脆性断裂^[24-25]。这主要是因为温度低于400℃时,花岗岩内部热破裂数量和密度较小,热破裂不是影响岩石力学性质的主导因素。当温度高于400℃时,高温产生的热膨胀应力强于晶粒间的胶结

力,热破裂数量和密度增大,并且出现了穿晶破裂,部分微裂隙快速发育后贯通,岩石脆性下降^[26]。

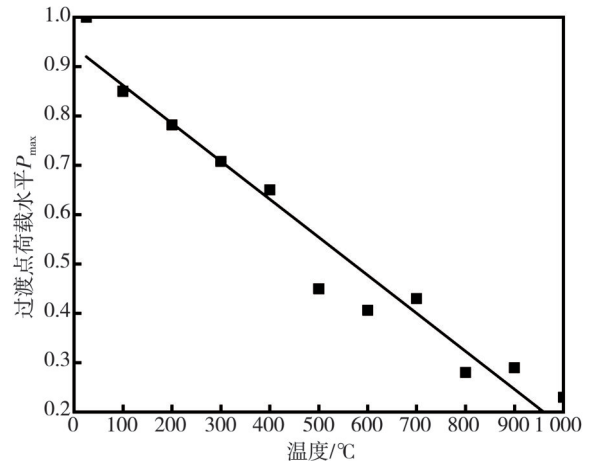


图7 过渡点处荷载水平与温度的关系

Fig. 7 Relationship between load level and temperature at transition point

4 结论

本文采用DIC方法实时监测热处理后(25~1000℃)花岗岩劈裂过程中的应变场演化过程,研究了高温对花岗岩劈裂破坏裂纹的孕育、萌生和扩展过程的影响,得出以下结论:

1) 随着热处理温度的升高,花岗岩劈裂破坏后宏观断口的弯曲程度加剧,岩石的失稳模式由拉伸破坏变为拉剪混合破坏。

2) 不同热处理温度下,花岗岩的主应变-时间曲线在劈裂过程中总体经历了弹性阶段—塑性阶段—破坏阶段的变化过程,常温(25℃)时,塑性变形阶段和破坏阶段极短,断裂模式为脆性破坏;100~500℃时塑性阶段应变积累明显,破坏

阶段很短, 断裂模式仍为脆性破坏; 600~1 000 °C 时, 破坏阶段明显, 破坏模式转变为延性破坏。

3) 随着温度的升高, 花岗岩延性不断增大, 端部效应逐渐减弱, 主应变的积累速率在塑性变形阶段内逐渐增大, 弹塑性过渡点 P_{E-F} 逐渐前移, 相应的荷载水平整体线性降低。

参考文献:

- [1] BARLA G. Comprehensive study including testing, monitoring and thermo-hydro modelling for design and implementation of a geothermal system in Torino (Italy) [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2017, 3(2): 175-188.
- [2] LUO Jin, ZHU Yongqiang, GUO Qinghai, et al. Chemical stimulation on the hydraulic properties of artificially fractured granite for enhanced geothermal system[J]. *Energy*, 2018, 142: 754-764.
- [3] GONG F Q, LI X B, DONG L J. Algorithm to estimate tensile modulus of rock in disk impact splitting test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(4): 705 - 713.
- [4] 吴阳春, 邵保平, 王磊, 等. 高温后花岗岩的物理力学特性实验研究[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 physical and mechanical properties of granite after high temperature [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(1): 193-203. (in Chinese).
- [5] 吴顺川, 郭沛, 张诗淮, 等. 基于巴西劈裂实验的花岗岩热损伤研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37 (S2): 3805-3816.
WU Shunchuan, GUO Pei, ZHANG Shihuai, et al. Study on thermal damage of granite based on Brazilian splitting test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37 (S2): 3805-3816. (in Chinese)
- [6] YANG Shaoqiang, YANG Dong, KANG Zhiqin. Experimental Investigation of the anisotropic evolution of tensile strength of oil shale under real-time high-temperature conditions[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(3): 2513-2528.
- [7] MASRI M, SIBAI M, SHAO J F, et al. Experimental investigation of the effect of temperature on the mechanical behavior of Tourmemire shale [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 185-191.
- [8] TANG C A, KOU S Q. Crack propagation and coalescence in brittle materials under compression [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998, 61 (3/4): 311-324.
- [9] SU H J, QIN X F, FENG Y J, et al. Experimental investigation of mixed mode I-II fracture property of thermally treated granite under dynamic loading [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 118: 103267.
- [10] ZHAO Z H. Thermal influence on mechanical properties of granite: a microcracking perspective [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49 (3): 747-762.
- [11] LI Z H, WONG Y N L, TEH I C. Influence of thermal and mechanical loading on development of microcracks in granite [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(5): 2035-2051.
- [12] WANG Y, GAO Y, LIU Y, GAO Z, et al. Optimal aperture and digital speckle optimization in digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 64(4): 677-684.
- [13] SHARAFISAF A M, ALIABADIAN Z, SHEN L M. Crack initiation and failure of block-in-matrix rocks under Brazilian test using digital image correlation [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 109: 102743.
- [14] ALIABADIAN Z, ZHAO G F, RUSSELL A R. Crack development in transversely isotropic sandstone discs subjected to Brazilian tests observed using digital image correlation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119: 211-221.
- [15] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDA E K. Pre-Peak and post-peak rock strain characteristics during uniaxial compression by 3d digital image correlation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2541-2554.
- [16] 张科, 张凯. 裂隙砂岩变形破裂过程中应变场灰度及纹理特征分析 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(4): 1253-1262.
ZHANG Ke, ZHANG Kai. Analysis of grayscale and texture characteristics of strain field during deformation and rupture of fractured sandstone [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(4): 1253-1262. (in Chinese)
- [17] MA Shaopeng, DONG Yan, XIAN Wang, et al. Damage observation and analysis of a rock brazilian disc using high-speed dic method [J]. *Applied Mechanics Materials*, 2011, 70: 87-92.
- [18] KOU Baofu, ZHANG Dengke, MENG Tao, et al.

- Micro and macro evaluation of tensile characteristics of anisotropic rock mass after high temperatures treatment—a case study of Lingshi Gneiss[J]. *Geothermics*, 2022, 102: 102409.
- [19] LI Cunbao, ZOU Bingbing, ZHOU Hongwei, et al. Experimental investigation on failure behaviors and mechanism of an anisotropic shale in direct tension[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(4): 98.
- [20] 闵明, 张强, 蒋斌松, 等. 实时高温下北山花岗岩劈裂实验及声发射特性[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(3): 108-113.
- MIN Ming, ZHANG Qiang, JIANG Binsong, et al. Splitting test and acoustic emission characteristics of Beishan granite under real-time high temperature[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(3): 108-113. (in Chinese)
- [21] 徐纪鹏, 董新龙, 付应乾, 等. 不同加载边界下混凝土巴西劈裂过程及强度的DIC实验分析[J]. *力学学报*, 2020, 52(3): 864-876.
- XU Jipeng, DONG Xinlong, FU Yingqian, et al. DIC experimental analysis of Brazilian splitting process and strength of concrete under different loading boundaries[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(3): 864-876. (in Chinese)
- [22] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉, 等. 高温处理后红砂岩抗拉强度及其尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 2879-2887.
- SU Haijian, JING Hongwen, ZHAO Honghui, et al. Study on tensile strength and size effect of red sandstone after high temperature treatment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2879-2887. (in Chinese)
- [23] ERARSLAN N, Microstructural investigation of sub-critical crack propagation and Fracture Process Zone (FPZ) by the reduction of rock fracture toughness under cyclic loading[J]. *Engineering Geology*, 2016, 208: 181-190.
- [24] 孙文进, 金爱兵, 王树亮, 等. 基于DIC的高温砂岩劈裂力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 511-518.
- SUN Wenjin, JIN Aibing, WANG Shuliang, et al. Study on splitting mechanical characteristics of high-temperature sandstone based on DIC[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 511-518. (in Chinese)
- [25] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Temperature-dependent mechanical behavior of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments[J]. *Engineering Geology*, 2017, 229: 31-44.
- [26] ZUO Jianping, WANG Jintao, SUN Yunjiang, et al. Effects of thermal treatment on fracture characteristics of granite from Beishan, a possible high-level radioactive waste disposal site in China[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 182: 425-437.