

基于 DIC 及 CPG 技术的热冷循环后花岗岩 I 型 断裂特性

吴秋红¹, 夏宇浩², 赵延林², 翁磊³, 王世鸣⁴, 冯淦⁵

(1. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 4. 湖南科技大学 土木学院, 湖南 湘潭 411201; 5. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 6100652)

摘 要:深部储层岩石的热力学特性, 尤其是循环热冷作用下损伤破坏特性, 对于增强型地热系统井壁稳定性分析及地热开采效率评估具有重要意义。针对中心直裂纹半圆盘 (NSCB) 花岗岩试样, 首先进行不同热冷循环处理 (加热温度 400 °C, 最高循环次数 13 次), 然后开展 3 点弯 I 型断裂韧度特性试验。基于裂纹扩展计 (CPG) 和数字图像相关 (DIC) 测试技术, 研究了热冷循环作用下花岗岩 I 型断裂韧度、断裂过程区 (FPZ)、裂纹扩展速率及断裂轮廓特征的影响规律。试验结果表明: 当热冷循环次数达到 10 次以上, 花岗岩试样脆性明显减弱, 而峰前软化特性和峰后延性增强; 花岗岩的断裂过程区由裂缝尖端开始逐步孕育, 断裂过程区长度随荷载增大呈先增大后减小的趋势, I 型断裂韧度、最大断裂过程区长度及裂纹平均扩展速度随热冷循环次数增大而指数减小, I 型断裂面随热冷循环次数增大越来越不平整。最后, 基于 X-ray 衍射 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 等微观测试技术, 研究了热冷循环作用对花岗岩矿物成分及微观结构的影响规律, 结果表明花岗岩 4 种矿物成分的峰值衍射强度及矿物质量分数均随热冷循环次数增大而降低, 而微裂纹大小及数量随热冷循环次数增大而增大。热冷循环作用下花岗岩的损伤劣化机理包含了多次高温热损伤、水冷冲击及水弱化等 3 方面的联合作用结果。

关键词:热冷循环; 断裂韧度; 断裂过程区; 裂纹扩展速度; 裂纹扩展计 (CPG) 技术; 数字图像相关 (DIC) 技术

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)07-3102-16

An integrated DIC and CPG investigation of the model-I fracture features for granites after cyclic heating-cooling treatments

WU QiuHong¹, XIA Yuhao², ZHAO Yanlin², WENG Lei³, WANG Shiming⁴, FENG Gan⁵

(1. Work Safety Key Laboratory on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 5. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

收稿日期: 2023-08-09 修回日期: 2023-12-25 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0974

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52374089, 52278412); 湖南省研究生科研创新资助项目 (CX20231051)

作者简介: 吴秋红 (1985—), 男, 湖南涟源人, 教授, 博士。E-mail: qiuHong.wu@hunust.edu.cn

通讯作者: 翁磊 (1987—), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士。E-mail: leiWeng@whu.edu.cn

引用格式: 吴秋红, 夏宇浩, 赵延林, 等. 基于 DIC 及 CPG 技术的热冷循环后花岗岩 I 型断裂特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3102-3117.

WU QiuHong, XIA Yuhao, ZHAO Yanlin, et al. An integrated DIC and CPG investigation of the model-I fracture features for granites after cyclic heating-cooling treatments[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3102-3117.



移动阅读

Abstract: The thermo-mechanical properties of deep reservoir rocks, especially the damage and failure characteristics under heating-cooling cycles, are of great importance to the stability analysis of well wall and the evaluation of geothermal extraction efficiency for the enhanced geothermal systems. In this study, the notched semi-circular bend (NSCB) granite samples were first subjected to varying cycle heating-cooling treatments, and then were submitted to three-point bending tests so as to obtain the model I fracture features. Based on the crack propagation gauge (CPG) measurement and digital image correlation (DIC) technique, the model I fracture toughness, fracture process zone (FPZ), crack propagation velocity and fracture surface topographic features of the samples after varying cyclic heating-cooling treatments were studied. The experimental results indicate that when the number of heating-cooling cycles reaches 10 or more, the brittleness of the granite specimens is obviously weakened, whereas the pre-peak softening and post-peak ductile responses are enhanced. The fracture zone of granite is gradually developed from the crack tip. The FPZ length tends to first increase and then decrease with increasing load, and the mode I fracture toughness, maximum length of FPZ and average crack propagation velocity decrease exponentially with increasing number of heating-cooling cycles. The fracture surface becomes more uneven with the increase in the number of the heating-cooling cycles. Finally, the mineral composition and microstructure of granite samples after different cycle heating-cooling treatments were investigated based on the X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) tests. The results show that the peak intensity of XRD and mineral content of the four minerals decrease with the increase in the number of heating-cooling cycles, while the size and number of the microcracks increase with the increase in the number of heating-cooling cycles. The deterioration mechanism of the granite upon the heating-cooling cycles includes the combined effects of thermal-induced damage, water quenching damage and water weakening effects.

Key words: cyclic heating-cooling; fracture toughness; fracture process zone; crack propagation velocity; crack propagation gauge (CPG) technique; digital image correlation (DIC) technique

干热岩 (HDR) 是一种致密低渗透岩体, 通常埋深于地下 3~10 km, 温度在 150~650 °C, 其作为一种新型清洁可再生能源, 已受到世界各国高度关注与重视^[1-3]。目前, 增强型地热系统 (EGS) 是有效开采干热岩的技术之一^[4-5], 该技术通过人工压裂诱导干热岩形成高渗透率、连通性好的地热储层, 然后通过注入冷水与高温岩体进行热交换, 通过生产井将热水抽出用于发电和其它工业用途。地热开采过程中, 高温储层岩石会直接接触冷水, 导致储层岩石遭受热冲击的影响^[6-7]。反复的热交换过程引起储层岩石多次冷却和升温, 导致储层岩石物理力学性质受损劣化^[8-9], 内部矿物颗粒不断收缩膨胀可能导致井壁掉块、坍塌和陷落, 进而影响干热岩的开采效率。因此, 研究热冷循环作用下岩石的损伤破坏特性对干热岩地热能的开发利用具有重要的理论和工程指导意义。

相比于单次热冲击, 热冷循环作用下岩石内部的损伤演化过程更加复杂^[10], 国内外学者对此进行了大量的研究, 研究表明岩石的力学特性与循环次数、目标温度及应力水平等因素密切相关。随着热冷循环次数的增加, 岩石的峰值抗压强度^[11]、抗拉强度^[12-13]、弹性模量^[14]、泊松比^[15]、纵波波速^[16]及比热容^[17]都会降低, 而轴向峰值应变及最大体积应变^[18]、孔隙率^[19]及渗透率^[20]则会增大。VOAKE 等^[21]研究了热冷循环

对干燥和饱和方解石试样抗拉强度的影响规律, 结果显示热冷循环作用对饱和试样抗拉强度的影响更为明显, 且随循环次数的增加, 抗拉强度下降更明显。此外, 岩石的声发射特性也会受热冷循环作用的影响^[22], 岩石损伤会在较低应力水平发生, 声发射撞击数、振铃计数及 b 随着循环次数增加而降低^[23]。热冷循环作用还会改变岩石的破坏模式, 随着循环次数增加, 岩石内部晶间微裂纹和晶内微裂纹数量均会逐渐增多^[24-25], 宏观上会由脆性破坏转变为延性破坏^[22]。

值得注意的是, 上述研究成果主要关注岩石在热冷循环下整体受拉或受压作用下的力学特性。然而, 大量研究表明, 岩石失稳断裂的根本原因是其内部微裂纹的萌生、扩展和贯通^[26-27]。地热储层中, 存在许多天然或人工裂缝, 作为传热通道进行热量交换。随着热交换的反复进行, 储层岩石内部裂隙网络通道会进一步扩展, 也可能萌生新裂隙, 从而促进渗透率和热量传递的增加^[28]。但同时, 裂隙的萌生和扩展也会对增强型地热系统造成严重威胁^[29]。一方面, 裂隙的扩展会加剧水流损失并导致流动短路的发生。另一方面, 岩石的损伤和破裂会引发井壁失稳断裂, 严重影响地热能的开采效率。因此, 为了控制储层岩石裂纹衍生并保证井壁的安全, 有必要对热冷循环作用下岩石的断裂力学特性进行深入研究^[30]。FENG 等^[31]

研究发现,花岗岩的临界裂纹扩展半径随热冷循环次数增加而减少,其 I 型断裂韧度在 1~5 次热冷循环期间下降幅度较大。YIN 等^[32]研究表明,热冷循环作用会导致花岗岩严重损伤,随着温度和循环次数的增加,试样孔隙度增大, I 型断裂韧度及累积声发射数降低。EBRAHIMI 等^[33]采用人字形切槽巴西圆盘 (CCNBD) 凝灰岩试样,研究热冷循环作用对 I 型及 II 型断裂特性的影响,结果表明第 1 次热冷循环后,试样 I 型及 II 型断裂韧度增加,随后随着循环次数增加而减少。WANG 等^[34]研究了液氮循环冷冲击作用后花岗岩的 I 型断裂力学特性,发现随循环次数增加,花岗岩 I 型断裂韧度及 P 波速度逐渐降低,而孔隙度及声发射累积能量逐渐增加。DEHGHANI 等^[35]采用 NSCB 大理岩试样研究热冷循环作用对其裂纹萌生、扩展及断裂模式的影响,发现试样 I 型断裂韧度、载荷-时间曲线及裂纹起裂角等受热冷循环作用的影响较大。

通过以上分析可以看出,目前对于岩石在热冷循环作用下的断裂力学特性研究并不充分,大多数研究关注于热冷循环作用对岩石断裂韧度和宏观破裂特征的影响。由于岩石具有非均质性和各向异性等特征,在断裂破坏过程中会出现断裂过程区 (Fracture Process Zone, FPZ)^[36]。由于 FPZ 的存在,基于线弹性理论建立的经典断裂力学理论无法准确描述岩石失稳断裂特性,所以研究岩石断裂过程区成为国内外学者的热点。近年来,许多学者采用不同的方法和技术^[37-38],对岩石断裂过程区进行了深入的研究,如数字图像相关 (DIC) 技术、声发射 (AE) 技术等,为理解岩石断裂过程提供了有益参考。例如,傅帅咏等^[39]采用 DIC 技术与声发射技术研究了花岗岩中 FPZ 范围,发现 FPZ 的边界可认为是沿裂纹扩展方向声发射能量由高能量突变并维持在低能量的位置。安定超等^[40]认为,岩石断裂过程区完全孕育时对应的载荷接近塑性屈服点载荷。XING 等^[41]研究了动载作用下 NSCB 砂岩试样的断裂过程区孕育过程,发现 FPZ 在峰值载荷前完成整个孕育过程,形态为半椭圆形,其宽度与加载率关系不大。LIN 等^[42]对 NSCB 砂岩进行静态压缩试验,基于 AE 与 DIC 技术分析了断裂过程区的大致范围及其与岩石粒径之间的相互关系。DUTLER 等^[43]提出了研究断裂过程区的理论模型,发现该模型预测岩石断裂过程中 FPZ 长度及宽度与 DIC 方法监测的形状及大小一致。然而,目前关于热冷循环作用对岩石断裂过程区影响机制方面的研究还比较欠缺。岩石在经历热冷循环作用后,内部会发生损伤劣化,内部裂纹起裂、扩展会变得尤为复杂。因此,对岩石热冷循环作用对断裂过程区的影响进行

深入研究具有重要意义。为了研究热冷循环作用对花岗岩断裂力学特性的影响,笔者采用 NSCB 试样首先开展不同次数的热-冷循环处理,然后采用 DIC 技术和 CPG 技术,对 NSCB 试样进行 3 点弯力学测试,研究热冷循环作用对花岗岩断裂韧度、断裂过程区、裂纹扩展速度和破坏断裂特性等影响规律。最后,从矿物成分演变及内部微裂纹变化等方面揭示热冷循环作用下花岗岩的断裂力学特性及损伤劣化机理。

1 试验准备及试验方法

1.1 试样制备

选用福建晋江地区的一种灰色致密花岗岩作为试验材料,如图 1(a) 所示。为了制备 NSCB 试样,遵循国际岩石力学学会 (ISRM) 推荐方法^[44],从大块花岗岩中钻芯取样,经过切割和磨削工序加工成半径 $R=25\text{ mm}$ 、厚度 $W=25\text{ mm}$ 的圆盘试样,试样端面平行度控制在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 以内。接着,采用圆形金刚石刀片将圆盘试样切成 2 个半圆盘,最后利用超薄金刚石切割片在半圆盘上中心位置切割宽度 $\delta=1\text{ mm}$ 、长度 $d=10\text{ mm}$ 的预制直裂缝,如图 1(b) 所示 (图中, S 为试件底部支撑间距)。该花岗岩的基本物理力学参数为:密度 $2\,617.6\text{ kg/m}^3$,纵波波速 $5\,203.1\text{ m/s}$,单轴抗压强度 189.2 MPa ,抗拉强度 13.5 MPa ,弹性模量 21.0 GPa ,泊松比 0.2 。

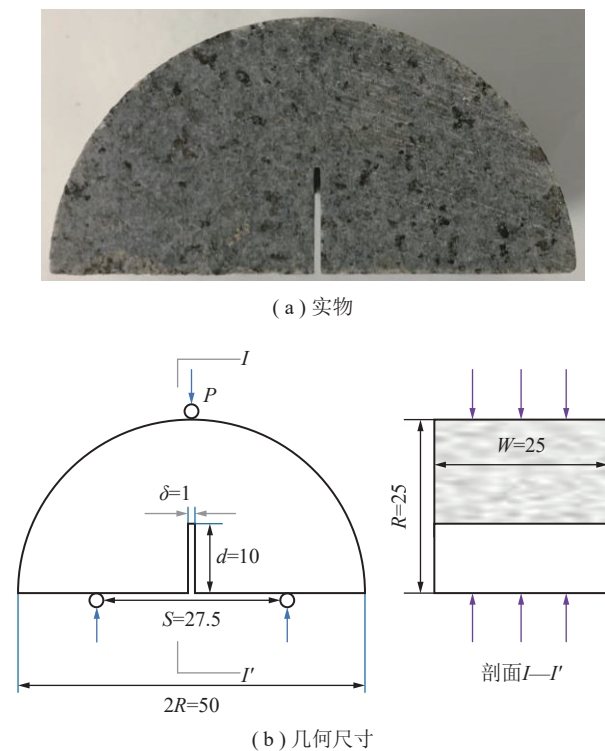


图 1 NSCB 试样实物及几何尺寸

Fig.1 Physical photo and geometric dimension diagram of the NSCB specimen

1.2 试样的热处理及试验设备

采用箱式电阻炉对花岗岩 NSCB 试样进行高温加热 (图 2(a))^[27], 利用温度控制器设定高温加热的目标温度为 400 °C。这主要是一方面 400 °C 是影响岩石力学特性的温度阈值^[7,45], 且处于干热岩的温度范围 (150~650 °C)^[3]; 另一方面所选花岗岩强度较高 (189.2 MPa), 预热处理过程中, 通过声波测试等手段发现目标温度设置过低会导致热冷循环作用对岩石力学特性的影响较小。试样加热前, 将每组试样均匀摆放在电阻炉内, 然后关闭炉门, 以 10 °C/min 的速率缓慢加热。由于升温速率过快会对岩石物理力学性质造成较大影响, 根据姜德义等^[46]的研究成果, 以 10 °C/min 的速率加热不会造成岩石的损伤^[47], 因此采用该

速率缓慢加温至目标温度。为避免试样内发生潜在热冲击, 达到目标温度后再恒温 6 h, 将试样取出浸入水中冷却至常温。最后将试样表面擦拭干净, 置于 105 °C 的恒温烘箱中烘干 24 h, 使试样充分干燥。上述过程记作 1 次热冷循环作用, 即热冷循环次数 $N=1$, 如图 2(b) 所示。本试验在 400 °C 下对自然状态下花岗岩 NSCB 试样分别进行 1、4、7、10、13 次热循环作用, 并将未进行热处理的试样作为对照组。需要说明的是, 花岗岩热处理过程中, 进行 15 次热循环后, 试样表面出现了明显的肉眼可见裂纹, 这可能会对岩石断裂力学性质的准确测定带来误差。因此, 为了保证 NSCB 试验的有效性, 选取最高热处理次数 13, 试样热处理后没有明显的表观裂纹。

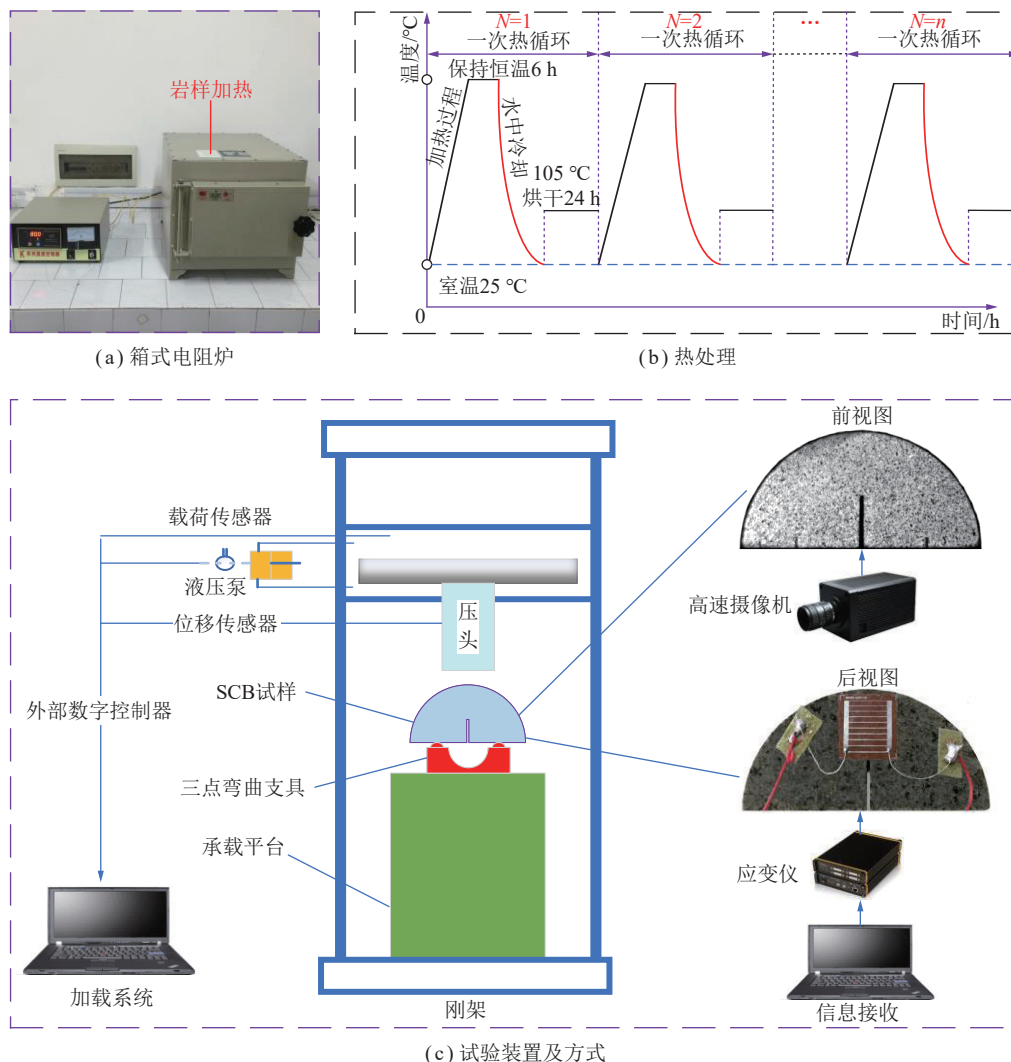


图 2 试样热冷处理及断裂试验系统

Fig.2 Heating-cooling treatments of samples and fracture test system

采用电液伺服控制试验机对 NSCB 试样进行断裂实验。试样首先放置自制的 3 点弯曲装置上, 跨距固定为 27.5 mm, 加载方式和试验系统如图 2(c) 所示。为了保证试验数据的有效性, 试验时采用量程为 50 kN

的小力传感器监测试样载荷变化, 测量精度为 0.001 kN。试验时采用位移控制方式, 以 0.002 mm/s 的加载速率缓慢加载直至试样破坏, 每种试验方案重复进行 3 次。采用高清相机 (FASTCAM SA1.1) 拍摄试样破坏全过

程,拍摄频率设置为2 500 fps,即每400 μs 拍摄1张图像,每张图像分辨率为384 Pixel \times 192 Pixel。此外,还采用裂纹扩展计(CPG)监测花岗岩的裂纹扩展速率,具体原理将在后续进行介绍。

2 试验结果与分析

2.1 载荷-时间曲线

图3显示了不同热冷循环次数下试样载荷-时间典型曲线,可以看出,载荷随时间增加的变化规律大致可以分为3个阶段:初始压密阶段、弹性阶段和失稳破坏阶段。在试样开始加载时,由于试样内部初始微裂纹闭合,载荷随时间呈非线性增长。随着时间的增加,试样呈现线弹性变形阶段,此阶段试验机不断加载试样积蓄能量,花岗岩内部微裂纹会不断萌生和扩展。在试样达到峰值载荷之前,试样没有出现很明显的应力强化过程。当裂纹尖端拉应力超过岩石的抗拉强度时,试样将不能承受更大的载荷而发生断裂,试样进入失稳破坏阶段,此阶段试样承载能力下降,形成宏观破裂裂纹。

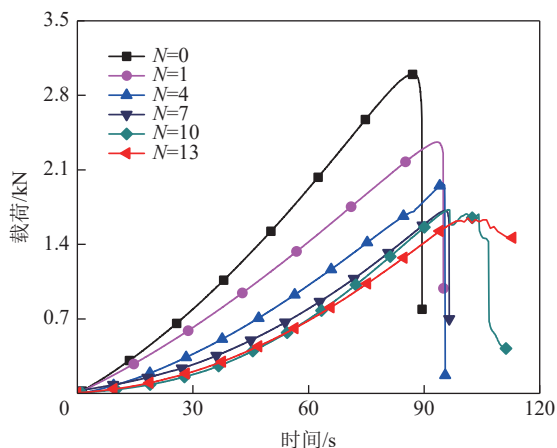


图3 不同热冷循环次数下试样载荷-时间典型曲线

Fig.3 Typical load-time curves of samples after cyclic heating-cooling treatments

由图3可知,随着循环次数的增加,载荷-时间的压密阶段逐渐增大,同时峰值荷载逐渐降低。当循环次数小于10次时,试样的承载能力达到峰值荷载后急剧下降,表现出明显的脆性特征。但当循环次数为10次和13次,部分试样承载能力达到峰值荷载后并没有迅速下降,而是持续压缩一定时间后才破裂,表现出较强的延性。这主要是由于热冷循环过程中,热应力导致岩石内部矿物颗粒不均匀膨胀和收缩变形,使得花岗岩内部矿物颗粒黏结性能下降,同时微裂纹得以萌生。随着循环次数的增加,内部微裂纹数量越多,试样加载过程中需要更多时间来完成裂隙闭合,导致试样的压密时间变长,同时峰后延性增强。

2.2 I型断裂韧度

断裂韧度是用来衡量脆性材料抵抗裂缝扩展难易程度的指标。根据ISMR推荐方法^[44],NSCB试样I型断裂韧度计算式为

$$K_{IC} = Y' \frac{P_{\max} \sqrt{\pi d}}{2RW} \quad (1)$$

$$Y' = -1.297 + 9.516S/(2R) - [0.47 + 16.457S/(2R)]\beta + [1.071 + 34.401S/(2R)]\beta^2 \quad (2)$$

式中, K_{IC} 为断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; P_{\max} 为峰值载荷,kN; Y' 为应力强度因子,由式(2)得出 $Y'=3.3269$; $\beta=d/R$ 。

图4显示了试样断裂韧度随热冷循环次数的变化规律。未经过热冷循环处理的试样断裂韧度最大,抵抗断裂变形的能力最强。随着热冷循环次数的增加,花岗岩的断裂韧度呈现下降趋势。图4展示了热冷循环作用下试样断裂韧度的下降幅度,与未进行热处理试样相比,经历1次热冷循环后试样断裂韧度下降尤为明显,断裂韧度由初始值 $1.47 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 下降至 $1.04 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,下降幅度为29.3%;经历4~7次冷却循环后下降速率变缓,断裂韧度由 $1.04 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 下降至 $0.83 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,下降幅度为14.2%;经历10~13次冷却循环后断裂韧度由 $0.83 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 下降至 $0.74 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,仅下降6.2%。这主要是由于岩石承载能力主要依赖其内部矿物颗粒之间的黏结及摩擦力。在热冷循环作用下,由于热应力的影响,矿物颗粒会膨胀和收缩,热冷交替循环则导致矿物颗粒内部和颗粒间微小裂纹的出现和扩展。此外,岩石内部还存在云母等敏感于水的矿物,反复浸泡过程中会削弱颗粒间的黏结力,进一步促进微小裂纹的形成。

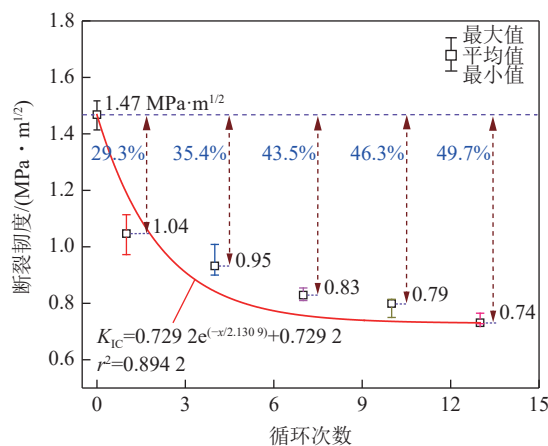


图4 断裂韧度随热冷循环次数的变化规律

Fig.4 Variation of the fracture toughness with the number of heating-cooling cycles

为了描述试样断裂韧度随循环次数的变化规律, 使用指数函数进行拟合, 具体为

$$K_{IC} = ae^{(-x/b)} + c \quad (3)$$

其中, a 、 b 、 c 为待定系数。通过对断裂韧度与循环次数的变化关系进行拟合, 得到了拟合公式及相关系数, 如图 4 所示, 可以看出, 相关系数为 0.894 2, 表明该函数能够较好地描述断裂韧度随循环次数的变化关系。

2.3 断裂过程区孕育特征

由于岩石的非均质性, 断裂过程区的孕育过程十分复杂, 经典的弹塑性力学理论很难对其进行精准的描述。对此, HILLERBORG 等^[36]提出虚拟裂纹模型, 假设裂纹尖端的断裂过程区为应变软化区, 以临界张开位移判定断裂过程区的孕育长度, 但理论求解过程依然较为复杂。近年来, 许多学者基于这一思想, 结合新监测技术来研究断裂过程区的孕育过程^[38,40,48]。

为此, 根据以往的研究成果^[38,40,48], 基于 DIC 技术, 研究不同热冷循环次数作用下岩石的断裂过程区孕育特征。具体地, 首先通过高速摄像捕捉试验过程中试样图片, 并使用 DIC 技术分析获得不同时刻的水平位移场云图, 如图 5 所示。然后在试样预制裂缝上方设置测试线, 参考线设置为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 \dots 、 L_n 。最后, 得到测试线的位移, 将其绘制成曲线, 根据曲线的变化情况来判断 FPZ 大小。

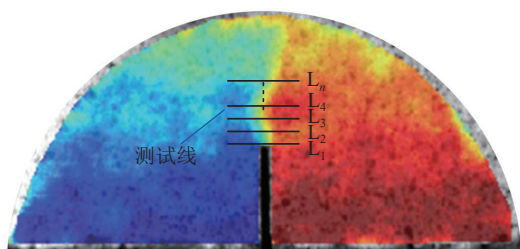
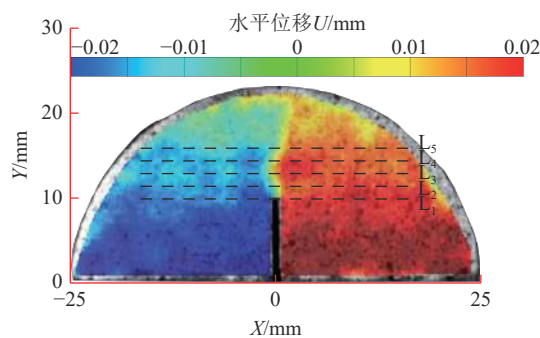


图 5 FPZ 长度的计算方法示意

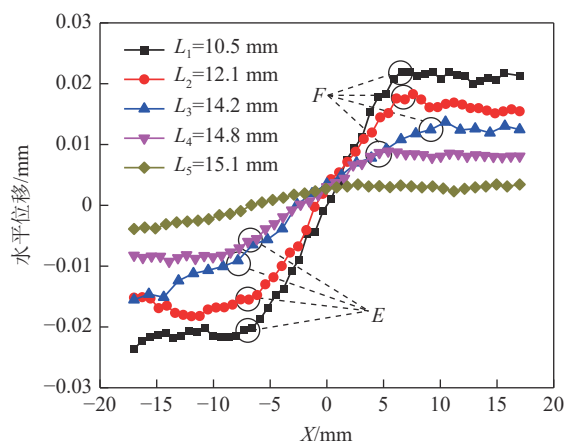
Fig.5 Schematic diagram of the calculation method of the FPZ length

下面以热冷循环 7 次的试样 ($N=7$) 为例, 详细阐述如何获取 FPZ 大小。图 6(a) 显示了试样失稳断裂前 1 200 μs 时的水平位移云图, 裂纹尖端坐标 $x=0$, $y=10$ mm。在图中设置了 5 条水平测试线 (L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5), 测试线在 X 轴范围为 -17.5 mm $< x < 17.5$ mm, 测试线在 Y 轴坐标分别为 $L_1=10.5$ mm、 $L_2=12.1$ mm、 $L_3=14.2$ mm、 $L_4=14.8$ mm、 $L_5=15.1$ mm。图 6(b) 描绘了 5 条水平测试线的位移变化特征, 从图中跳跃点 E 、 F 可以看出, 在预制裂缝尖端附近, 测试线水平位移跳跃明显。 L_2 测试线水平位移跳跃量比 L_1 测试线低, L_3 、 L_4 测试线水平位移也发生了一定的跳跃, 跳跃量

随距尖端距离增加而逐渐降低, 但 L_5 测试线水平位移没有明显的跳跃点, 这表明 L_5 测试线所在的位置处于试样的弹性区域。综上所述, 断裂过程区长度在 L_4 测试线 ($y=14.8$ mm) 与 L_5 测试线 ($y=15.1$ mm) 之间。



(a) 水平位移云图



(b) 测试线水平位移变化特征

图 6 基于水平测试线的 FPZ 分析

Fig.6 The FPZ analysis based on horizontal test lines

为了进一步确定断裂过程区的长度, 在预制裂缝尖端附近设置了 2 条竖直测试线 H_1 和 H_2 , 如图 7(a) 所示。 H_1 测试线的坐标为: $x=-1.5$ mm、 10 mm $< y < 16$ mm, H_2 测试线的坐标为: $x=1.5$ mm、 10 mm $< y < 16$ mm。图 7(b) 描绘了竖直测试线的位移变化特征。可以看出, 在 C 点 ($y=10$ mm) 至 A 点 ($y=14.8$ mm) 内, 水平位移变化相对较大, 而张开位移逐渐减小。例如, C 点与 D 点之间张开位移 ($w_2=41.8$ μm) 远远高于 A 点与 B 点之间的张开位移 ($w_1=3.4$ μm)。从 A 点后, 张开位移逐渐向 0 靠近, 结合图 6 的水平测试线得到的结果, 从而可以确定 A 点到 C 点的竖直方向距离为断裂过程区的长度, 通过计算得到其值为 4.8 mm, 这也表明断裂过程区是从预制裂缝尖端开始逐渐向加载端扩展的。

上述仅仅分析了试样在某一时刻的 FPZ。然而, 许多研究表明, 断裂过程区长度与试样所受载荷密切

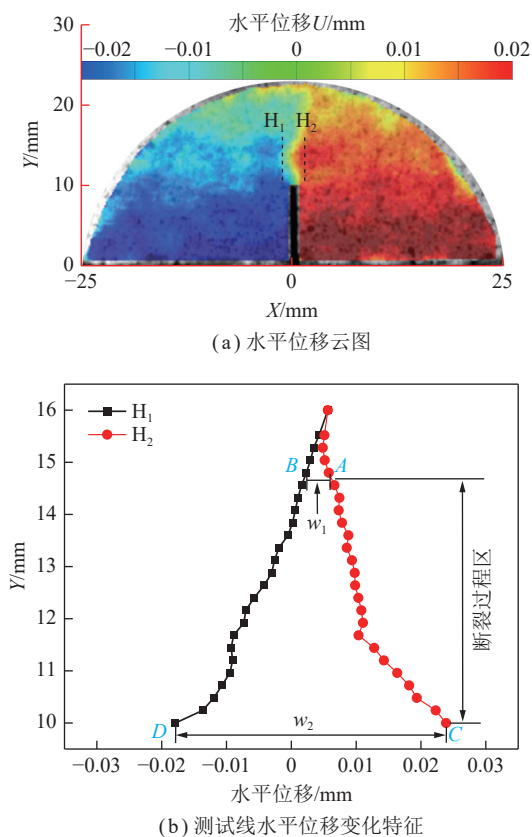


图7 基于竖直测试线的FPZ分析

Fig.7 FPZ analysis based on vertical test lines

相关,并且断裂过程区的孕育过程一般在试样达到峰值载荷之前。图8显示了 $N=1$ 和 $N=7$ 试样的断裂过程区孕育过程,其中时刻 F 表示试样达到峰值载荷。可以看出,应变云图很好地反映了预制裂缝尖端断裂过程区的孕育过程。断裂过程区并不是一开始随着载荷的增加而产生的,而是随着裂纹尖端附近微裂纹的萌生、集聚,断裂过程区才会产生。例如, $N=7$ 试样在达到峰值载荷前 $2000\ \mu\text{s}$ 时才出现了断裂过程区。从图8还可以发现,断裂过程区长度在一开始随着载荷的增加而逐渐增加。当裂缝尖端出现应力集中现象时,高应变区开始集中在预制裂缝尖端,随着载荷的增加,宏观断裂开始出现并不断扩展,断裂过程区长度逐渐减小。例如, $N=1$ 试样在峰值载荷前 $2000\ \mu\text{s}$ (时刻 A)开始出现断裂过程区,其长度(图中白色双向箭头)为 $2.8\ \text{mm}$,随着载荷的增加,峰值载荷前 $1200\ \mu\text{s}$ 时(时刻 C),试样的断裂过程区长度达到最大值 $7.3\ \text{mm}$ 。随后,随着载荷的增加,断裂过程区长度逐渐减小,在试样达到峰值载荷时(时刻 F),断裂过程区长度仅为 $2.5\ \text{mm}$ 。随着载荷进一步增加,试样发生失稳断裂,不存在断裂过程区。

为了更深入地分析热冷循环对岩石FPZ的影响,图9显示了不同热冷循环次数下试样断裂过程区最

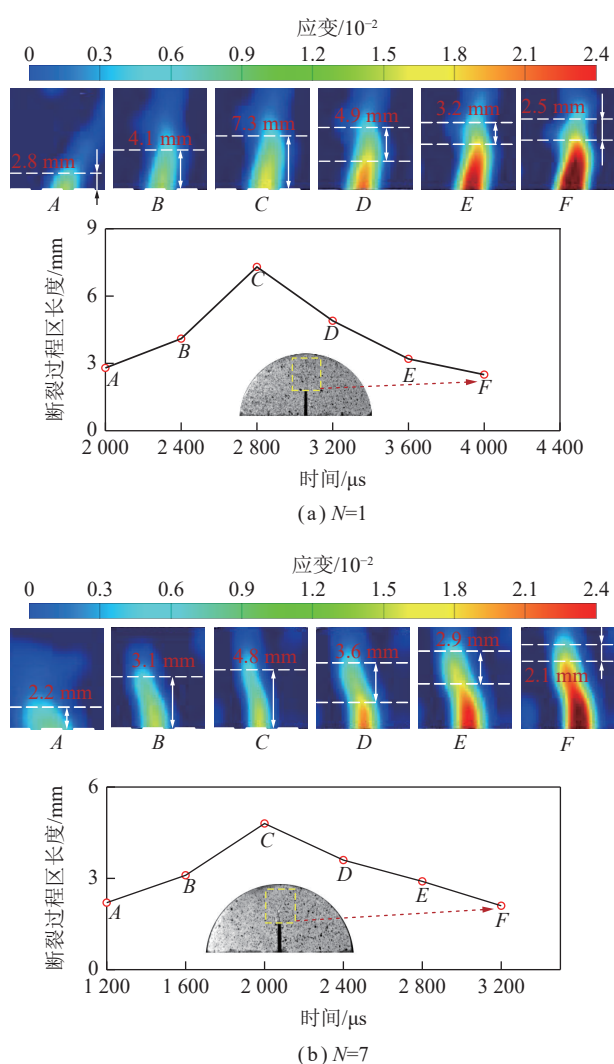


图8 花岗岩断裂过程区孕育全过程

Fig.8 Whole process of the development of the fracture process zone in granite

大长度的变化规律。可以看出,未经过热冷循环处理试样的断裂过程区最大长度最长,达到了 $8.4\ \text{mm}$ 。随着热冷循环次数的增加,花岗岩的断裂过程区最大长度呈下降趋势。图9中展示了热冷循环作用下试样断裂过程区最大长度的下降幅度,相对于未经处理的试样,经历 $0\sim 1$ 次热冷循环后下降幅度尤为显著,断裂过程区最大长度由 $8.4\ \text{mm}$ 下降至 $7.3\ \text{mm}$,下降幅度为 13.1% 。经过 7 次热冷循环后,FPZ最大长度下降的速度变缓。经历 $10\sim 13$ 次热冷循环后,断裂过程区的最大长度由 $3.7\ \text{mm}$ 下降至 $3.4\ \text{mm}$,下降幅度为 8% 。究其原因,在热冷循环作用下,由于热应力造成矿物颗粒的膨胀和收缩,导致预制裂缝尖端的微裂纹和裂隙形成并逐渐贯通,故试样在受到加载前就出现不同程度的损伤。随着热冷循环次数的增加,微裂纹的数量随之增加,试样预制裂缝尖端的损伤加剧,抵抗变形的能力减弱,因此导致断裂过程区的长度逐

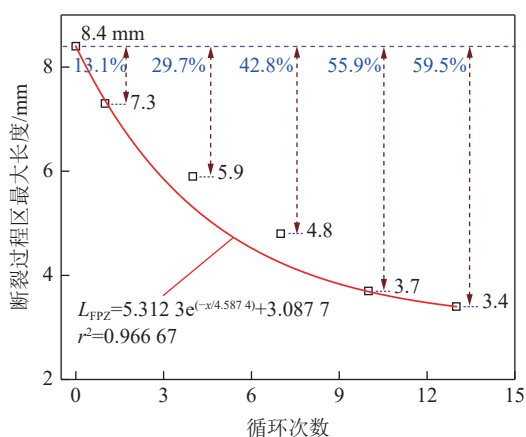


图9 断裂过程区最大长度随循环次数的变化规律

Fig.9 Variation of the maximum length of the fracture process zone with the number of heating-cooling cycles

渐减小。为了描述试样断裂过程区最大长度随循环次数的变化规律,采用指数函数对断裂过程区与和循

环次数的变化关系进行拟合,拟合公式为

$$L_{FPZ} = ae^{(-x/b)} + c \quad (4)$$

图9显示了拟合公式及相关系数,可以看出,相关系数达到0.96667,表明该函数能够很好地描述断裂过程区最大长度随循环次数的变化关系。

2.4 热冷循环对裂纹扩展速率的影响

使用采用型号为BKX5-10CY-10的裂纹扩展计(CPG)来测量岩石的裂纹扩展速度。该CPG由基底和敏感栅组成,总电阻为2Ω,如图10所示。敏感栅包括10根等长铜薄片,总长度及宽度分别为13.5、5.0 mm。相邻2根栅丝的距离为1.5 mm,但每根栅丝的宽度不同,因此其电阻不同。为确保裂纹扩展路径穿过栅丝,试验过程中将电阻较小的栅丝布置在裂纹尖端附近,而将电阻较大的栅丝布置在试样加载端附近。

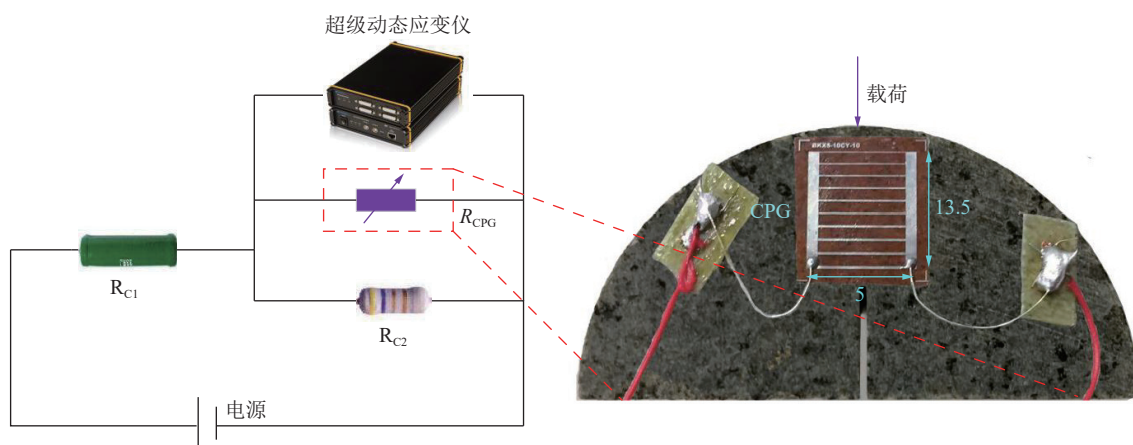


图10 CPG 测试系统

Fig.10 CPG test system

根据图10, CPG 线路的连接方式为: 首先将 CPG 与电阻 $R_{C2}(50\Omega)$ 并联, 再将它们整体与电阻 $R_{C1}(1\ 000\Omega)$ 串联。然后采用型号为 HY3005ET 的直流稳压电源为整个电路系统提供稳定的 20 V 电压。最后使用动态应变仪来监测 CPG 两端电压的变化。采用这种连接方法的主要目的是确保恒压源能够提供稳定的电压。如果恒压源提供的电压过小, 将会导致 CPG 测量电压振荡。而如果恒压源输出电压过大, 则会导致 CPG 温度升高而影响其电阻, 甚至导致 CPG 烧坏。以上 2 种情况都会导致测量误差, 从而影响试验结果的精度和有效性。因此, 应该注意控制恒压源输出电压, 以保证准确可靠地测量裂纹扩展速度。

断裂试验过程中, 由于应力集中的影响, 试样通常会从预制的裂纹尖端开始断裂, 然后逐渐扩展到试样的加载端。电阻较小的栅丝首先发生断裂, 然后随着载荷的继续增大, 距离裂纹尖端较远的栅丝也会被

逐渐拉断。由于每根栅丝的电阻不同, 因此每一根栅丝断裂后整个 CPG 的电阻会产生变化, 这种变化可通过动态应变仪进行记录。最后, 根据电信号的突变时间, 就可以计算得到裂纹的扩展速率。

图11显示了不同热冷循环作用后试样 ($N=0, 1, 4, 13$) 的 CPG 电压信号变化曲线。从图11可以看出, 随着时间的增加, CPG 电压信号呈阶梯状态逐步上升, 这表明裂纹扩展是一个非线性的断裂过程。为了更准确地确定栅丝的断裂时刻, 对得到的电压信号进行一阶求导, 通过倒数极值处即可确定断裂时刻。图中 10 个阶梯状的突变时刻对应着 CPG 上相应栅丝的断裂时刻, 对应图11中的 $t_1 \sim t_{10}$ 。鉴于相邻 2 个栅丝间的距离为 1.5 mm, 因此可以根据断裂时间差来计算裂纹的扩展速率。

图12给出了上述 4 个试样的裂纹扩展速度和裂尖位置, 其中散点代表相邻栅丝之间的裂纹扩展速度

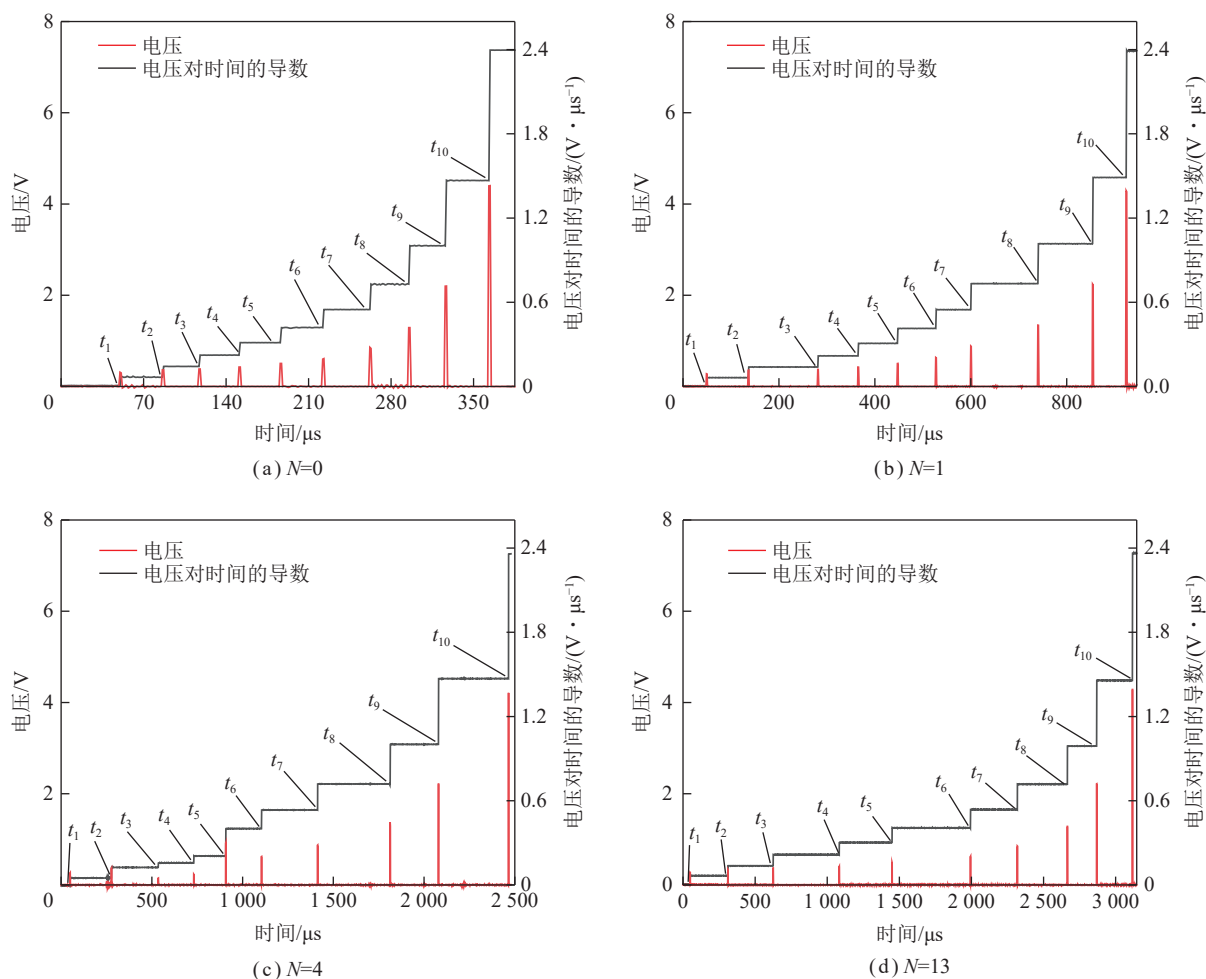


图 11 试样 CPG 电压信号及其对时间的导数

Fig.11 Voltage signal and derivative with respect to time recorded from the CPG on specimen

(v_i), 虚线代表 CPG 第 1 根栅丝到第 10 根栅丝断裂时间内的平均速度 (v_{avg}), 具体的计算公式为

$$v_i = \frac{l_0}{t_i - t_{i-1}}, \quad i=2 \sim 10 \quad (5)$$

$$v_{avg} = \frac{1}{9} \sum_{i=2}^n V_i, \quad n=10 \quad (6)$$

式中, l_0 为相邻栅丝之间的距离, 为 1.5 mm; t_i 为第 i 根栅丝的断裂时刻。

从图 12 可以看出, 不同热冷循环作用后, 试样的裂纹扩展速度 (v_i) 存在一定程度的振荡, 但总体都是在平均速度 (v_{avg}) 附近, 如 $N=1$ 时, 试样裂纹扩展速度最大值为 21.4 m/s, 最小值为 10.3 m/s, 平均值为 15.4 m/s。这主要由于岩石的非均质性及非连续性特性, 裂纹扩展过程中存在穿晶、沿晶及耦合断裂等多种模式^[49-50], 造成裂纹扩展通过的介质及路径的存在差异, 引起断裂时间不同, 进而导致裂纹扩散速度的振荡。图 13 给出了热冷循环次数为 0 及 7 次时 CPG 断裂扩展路径, 可以明显发现 CPG 断裂扩展路径十分曲折, 这也再一次证明裂纹扩展速率会存在一定振荡。

为了研究热冷循环作用对裂纹扩展速率的影响规律, 每种循环次数下都监测了 2 个试样, 图 14 给出了不同热冷循环次数下试样裂纹扩展平均速率的平均值 (\bar{v}_{avg}), 可以看出, 裂纹平均扩展速率随着热冷循环次数的增加而逐渐下降, 如第 1 次热冷循环作用后试样裂纹扩展速度由初始 45.9 m/s 下降至 17.8 m/s, 下降幅度为 61.2%, 经历 7 次热冷循环后, 下降幅度达到 87.4%, 而经历 13 次热冷循环后裂纹扩展速度下降幅度为 91.1%。此外, 图 14 也展示了热冷循环作用下试样裂纹扩展速度的下降幅度, 从图 14 可知, 试样裂纹扩展下降速率随热冷循环次数而不同, 试样经历 1 次冷却循环后裂纹扩展速率下降速率最大, 高达 61.2%; 经历 1~4 次冷却循环后下降速率变缓, 裂纹扩展速度由 17.8 m/s 下降至 7.6 m/s, 下降幅度为 22.2%; 经历 10~13 次冷却循环后裂纹扩展速度由 4.3 m/s 下降至 4.1 m/s, 仅下降 0.5%。根据杨仁树^[51]、高桂云^[52]等的研究成果, 发现裂纹的起裂、扩展及止裂等特性与裂纹尖端应力强度因子方面密切相关。裂纹扩展后, 应力强度因子较大表明裂纹尖端能量集聚能

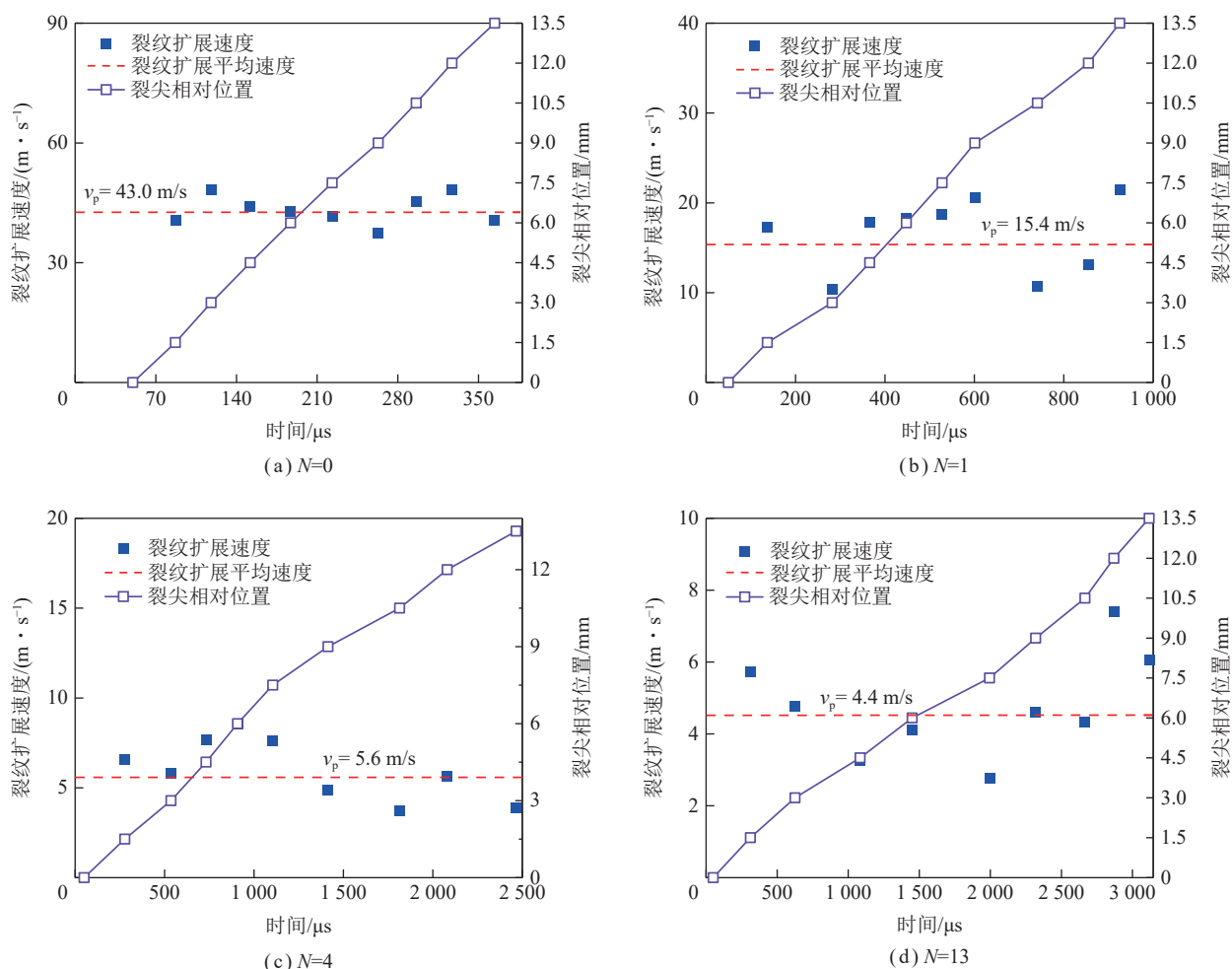


图 12 试样裂纹尖端位置及裂纹扩展速度

Fig.12 Crack tip position and crack propagation velocity of the sample

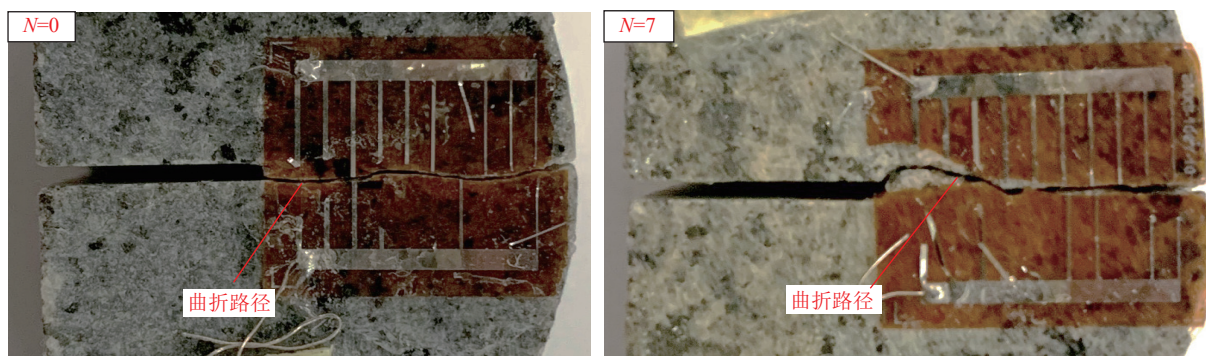


图 13 热冷循环作用下试样裂纹扩展路径

Fig.13 Crack propagation paths of samples after cyclic heating-cooling treatments

量较多,从而有利于该裂纹扩展,导致裂纹扩展速度较大。裂纹扩展过程中如果遇到孔洞、空隙等缺陷时,这些缺陷的存在会使得裂纹集聚的能量快速释放,应力强度因子降低,扩展行为被抑制,扩展速度变慢。岩石经历热冷循环作用后,其内部产生了大量微裂纹,孔洞或空隙数量也会增多,导致裂纹扩展过程中会消耗更多的能量,应力强度因子会降低,裂纹扩展速度下降。随着热冷却循环次数增加,尽管岩石内部产生

了不同程度的损伤,但损伤造成裂纹扩展过程中所消耗的能量变化较小。

为了表征试样裂纹扩展速率随循环次数的变化规律,采用指数函数对裂纹扩展速率与循环次数的变化关系进行拟合:

$$\bar{v}_{\text{avg}} = ae^{(-x/b)} + c \quad (7)$$

图 14 给出了拟合公式及相关系数,可以看出,相关系数为 0.995 28,这表明该函数能够很好地描述裂

纹扩展速度随循环次数的变化关系。

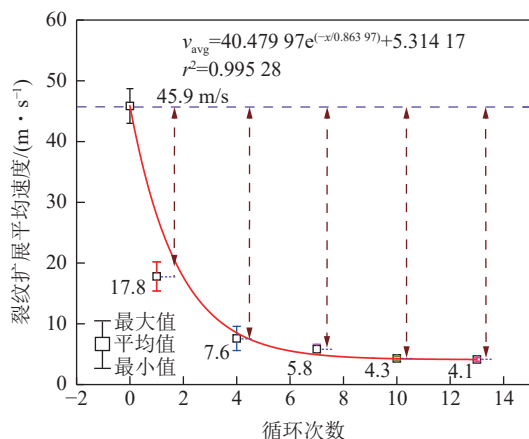


图 14 裂纹扩展速度随热冷循环次数的变化规律

Fig.14 Variation of crack propagation velocity with the number of heating-cooling cycles

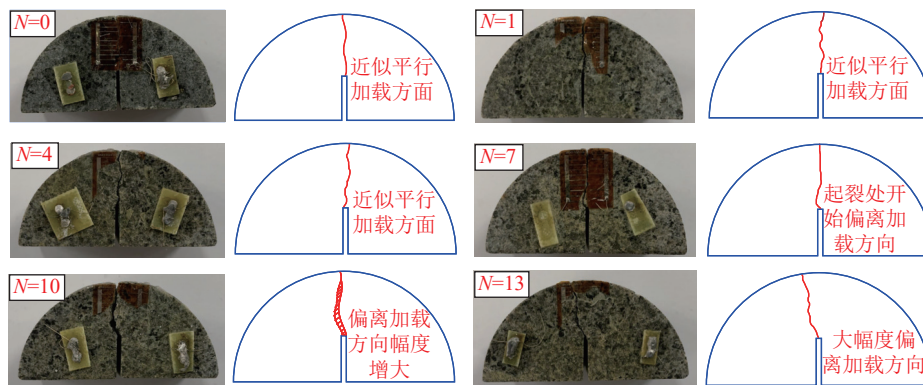


图 15 热冷循环作用下试样破坏模式

Fig.15 Failure modes of samples after cyclic heating-cooling treatments

3 热冷循环作用下花岗岩断裂力学性能劣化机理

花岗岩作为一种非均质材料,其内部存在着大量初始微孔洞和微裂隙。在多次热冷循环作用下,这些微缺陷开始扩展、汇合并连接贯通,加之矿物颗粒的不均匀收缩和膨胀,会引起矿物组分、分布、颗粒大小、微裂纹特征等变化,进而导致岩体的力学性能损伤劣化。许多研究表明,岩石宏观破坏的根本原因是内部结构损伤不断累积导致的结果^[53]。因此,下面将从热冷循环作用下花岗岩矿物成分和微观结构变化等方面来分析其损伤劣化机理。

3.1 热冷循环作用对花岗岩矿物成分的影响

花岗岩进行不同次数的热冷循环后,选取相同质量的粉末试样进行 XRD 分析。图 16 显示了不同热冷循环次数后花岗岩粉末 X 射线衍射图谱,可以看到,花岗岩主要包括斜长石、石英、黑云母及角闪石 4 种矿物成分,未进行热冷处理时 4 种矿物质量分数分别

2.5 破坏断裂特性

图 15 为不同热冷循环作用下试样的破坏断裂特性,可以看出,所有试样裂纹扩展路径都不是直线,存在一定的曲折,这主要跟岩石本身的非均质性有关。试样经历 0~4 次热冷循环后,裂纹尖端起裂没有发生明显的左右偏移,近似平行于加载方向。但试样经历 7~13 次热冷循环后,裂纹尖端起裂存在明显的左右偏移,特别地,经历 13 次热冷循环后,有试样裂纹扩展路径远偏离加载方向。这主要原因是热冷循环作用次数较低时,尽管试样产生了热损伤裂纹,但不足以影响裂纹往加载方向传播,随着循环次数增加,岩石内部产生的热损伤裂纹较多,尖端附近热损伤裂纹之间,及与岩石自由面的热裂纹之间形成了优势扩展方向,进而造成了裂纹扩展路径明显偏离加载方向。

为 59.4%、26.3%、8.3%、5.9%。此外,岩石粉末还存在白云母、钙长石、透闪石等其他矿物成分,质量分数为 1%。如图 16 所示,未进行热冷处理的试样斜长石、石英、黑云母及角闪石峰值衍射强度分别为 6 333、5 095、1 469、1 055,经历热冷循环作用后,4 种矿物成

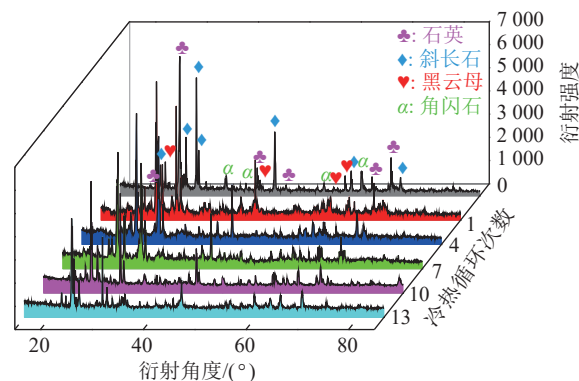


图 16 不同热冷循环次数后花岗岩粉末 X 衍射图谱

Fig.16 X-ray diffraction patterns of granite powders after cyclic heating-cooling treatments

分所对应的峰值衍射强度发了不同程度的下降, 经历 13 热冷循环后, 斜长石、石英、黑云母及角闪石峰值衍射强度分别为 5 268、2 969、984、911, 分别下降 16.8%、41.7%、33.0%、13.6%。由于某一物相的衍射强度与其参与衍射的体积成正比, 也就是说, 花岗岩中各矿物成分峰值衍射强度在一定程度上能反映其含量的变化规律。为此, 以下进一步深入分析热冷循环作用后花岗岩矿物成分变化规律及其演变机理。

图 17 显示了不同热冷循环次数后花岗岩粉末主要矿物成分质量分数。需要说明的是, 图中仅分析 4 种主要矿物成分质量分数变化, 其它次要矿物成分质量分数没有展示。由图 17 可以看出, 4 种主要矿物成分质量分数会随着循环次数的增加而下降, 斜长石及黑云母质量分数随热冷循环次数的增加下降较为明显, 经历 13 次热冷循环后, 斜长石及黑云母质量分数分别下降 18.2%、28.9%。石英与角闪石质量分数下降幅值较小, 经历 13 次热冷循环后, 石英及角闪石分别下降 8.4%、10.2%。对于斜长石, 由于其分解温度在 1 100~1 550 °C, 因而造成其质量分数降低主要因素是高温下长石结构相变、结构水的逸出, 及冷却作用下斜长石中敏感性成分 (钠长石和钙长石) 与水的化学反应^[54]。对于黑云母, 高温及冷却过程中其内部低价铁元素会发生氧化还原反应而转变成高价铁元素, 造成其化学组成的变化, 因而质量分数也会随循环次数的增加而降低。由于试验目标温度为 400 °C, 低于石英相变温度 (573 °C)、及角闪岩分解温度 (570~700 °C), 高温作用下它们能够保持较为稳定的结构, 因而质量分数下降主要来自其内部结构水的逸出及冷却作用下与水的微弱化学反应。

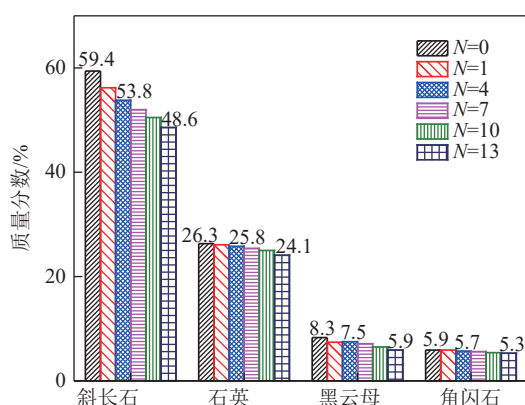


图 17 不同热冷循环次数后花岗岩粉末主要矿物成分质量分数

Fig.17 Mineral composition contents of granite powders after cyclic heating-cooling treatments

从上述分析可知, 热冷循环作用导致岩石矿物成分衍射强度及质量分数发生不同程度的下降, 同时也

造成岩石内部结构的改变, 如斜长石溶解及黑云母的氧化还原反应, 内部结构变化会弱化矿物颗粒间胶结力, 降低颗粒间摩擦力, 从而导致花岗岩力学特性的劣化。

3.2 热冷循环作用对微细观结构的影响

为了更直观地研究热冷循环次数对岩石内部结构的影响, 采用日立 SU3500 扫描电子显微镜对不同热冷循环次数下花岗岩进行微观结构扫描, 扫描结果如图 18 所示, 放大倍数为 200。由图 18 可以看出, 未经过热冷循环试件完整性较好, 内部结构清晰、表面较为光滑, 没有明显的裂缝, 致密性较好。经过 1 次热冷循环后, 花岗岩试样完整性较差, 内部出现了热裂纹, 局部还存在微小空洞, 这表明花岗岩受热冷循环作用开始发生损伤。随着热冷循环次数的增加, 经历 4 次热冷循环作用后, 内部可以清晰的看到一些大尺寸的裂缝。当循环次数达到 7 次时, 裂缝长度及宽度都明显增大。随着热冷循环次数增加, 微裂隙及孔洞数量开始增加, 裂纹之间出现了汇合贯通, 当热冷循环次数到 13 次后, 裂纹间的汇合贯通性增强, 试样内部出现了明显的松散。上述分析表明随着热冷循环次数增加, 花岗岩内部微裂隙增多, 裂隙长度及宽度逐渐增大, 裂隙间的贯通性逐渐增强, 试样完整性逐渐劣化。

3.3 热冷循环作用下花岗岩损伤劣化机理

根据热冷循环作用下花岗试样断裂力学特性、内部矿物成分及微观结构的演变规律, 花岗岩损伤劣化大致可以分为多次高温热损伤、水冷冲击及水弱化 3 个方面 (图 19)。可以看出, 花岗岩经历高温作用后 (图 19(a)), 会造成结构水的逸出及热应力的产生。一般认为, 当温度超过 300 °C 时, 花岗岩内部结构水会蒸发逸出, 导致矿物颗粒间黏结性能的弱化。由于矿物颗粒的热膨胀性质不同, 会导致颗粒内部及颗粒间产生热应力, 诱发微裂纹闭合或扩张。水中冷却后, 温度急剧下降过程中导致其内部产生温差应力, 研究表明^[55], 高温岩石冷却过程中会使得岩石表面产生拉应力, 当拉应力较大时, 会造成岩石表面微裂纹的贯通及扩展。此外, 冷却过程中内部矿物颗粒收缩不均匀性, 也会导致岩石内部的损伤, 这一点在 WU 等^[7, 27]的研究中也得到证实。花岗岩经历多次热冷循环作用后, 其内部会受到交替变化的拉压作用, 导致花岗岩出现疲劳损伤。岩石的损伤除了受上述因素影响外, 也会受到水弱化作用影响 (图 19(b)), 热冷循环作用下, 水容易进入内部空隙中, 岩石中敏感性水矿物会与水发生化学反应, 如钠长石和钙长石, 这也会导致矿物颗粒间的黏结性能降低。

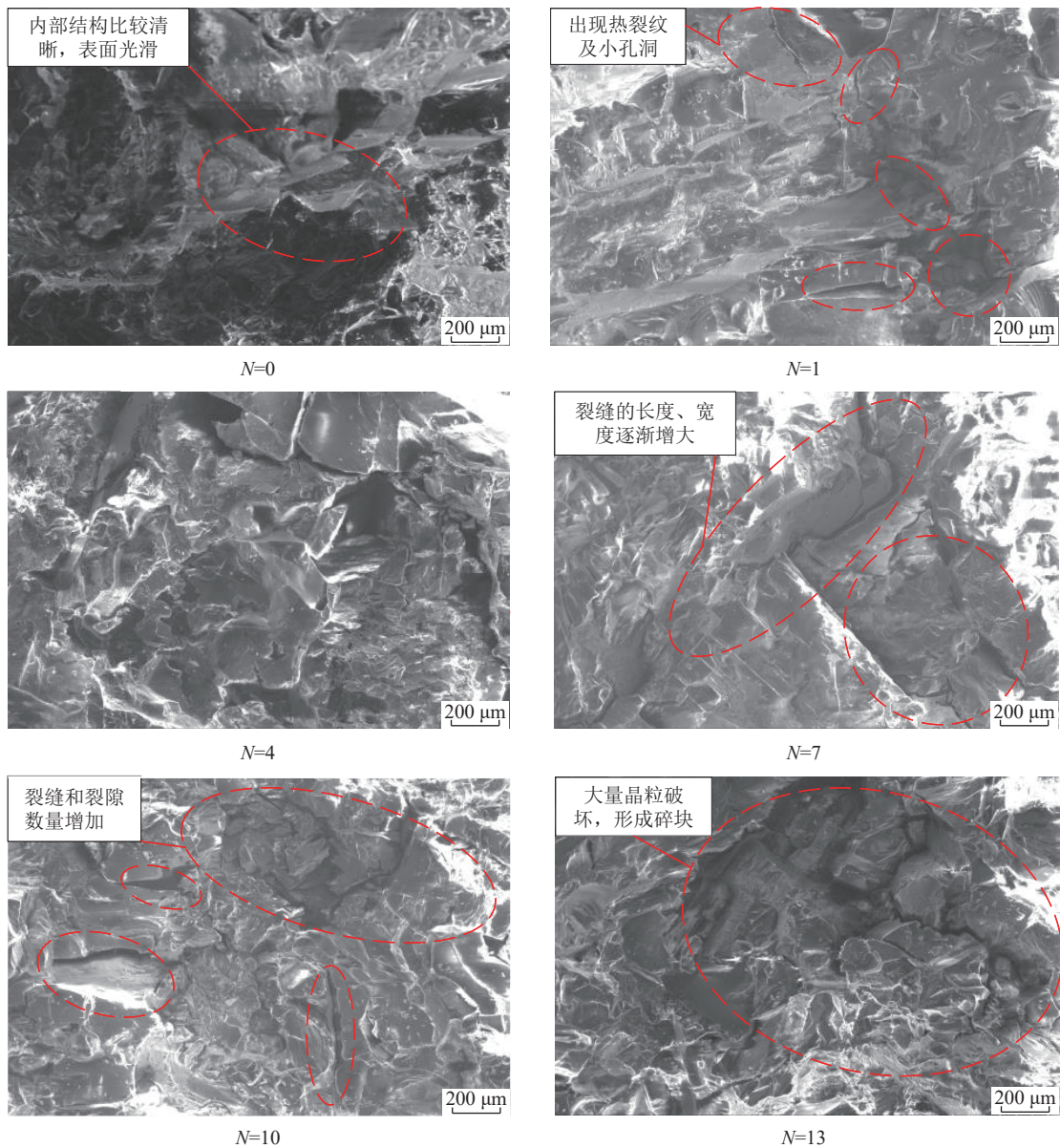


图 18 不同热冷循环次数下花岗岩的电镜扫描

Fig.18 SEM images of the granite after cyclic heating-cooling treatments

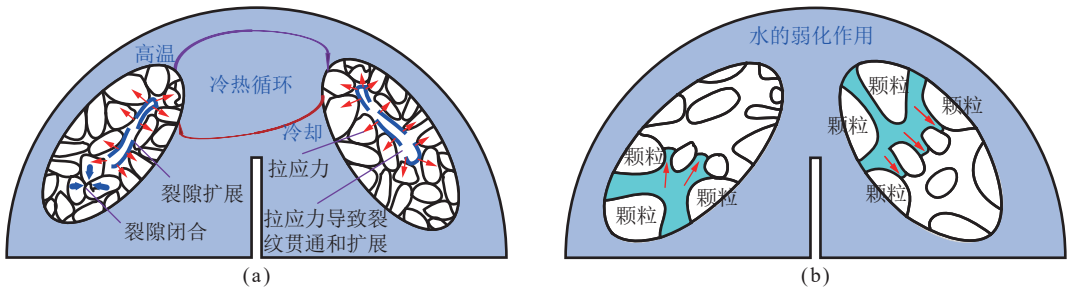


图 19 热冷循环作用下花岗岩损伤劣化机理

Fig.19 Damage and deterioration mechanism of the granite after cyclic heating-cooling treatments

通过论文研究发现,热冷循环作用是影响岩石损伤程度的一个重要因素,增加热冷循环作用次数可使岩石损伤劣化程度更明显,因此,高温岩石热冷循环作用下诱发裂纹这一机制已被应用于增强型地热系

统开发过程中。如干热岩储层的压裂改造一直是 EGS 开发中难点和热点,在水力压裂前采用冷媒介质(冷水、临界 CO_2 或液氮)对于干热岩进行循环热冷处理,可使高温储层产生大量裂缝,增加其渗透性和连通性,

从而实现地热能的高效开发。随着热冷冲击次数增加, 岩石内部损伤程度和范围也呈增大趋势, 这会威胁钻孔井壁安全, 降低地热能开采效率, 这也是值得注意的问题。

4 结 论

(1) 当热冷循环次数达到 10 次以上, 花岗岩试样脆性明显减弱, 而峰前软化特性和峰后延性增强。I 型断裂韧度随热冷循环次数增大而指数减小, 试样断裂面随热冷循环次数增大越来越不平整。

(2) 岩石断裂过程区由裂缝尖端开始逐步孕育, 断裂过程区长度随荷载增大呈先增大后减小的趋势, 最大断裂过程区长度随热冷循环次数增大而指数减小。

(3) 试样裂缝尖端起裂、扩展及宏观裂纹出现是一个快速形成过程, 热冷循环作用后花岗岩裂纹扩展速度不是定值, 存在一定程度的振荡, 但都是围绕裂纹平均扩展速度上下波动, 裂纹平均扩展速度随热冷循环次数增大而指数减小。

(4) 花岗岩 4 种矿物成分的峰值衍射强度及矿物含量均随热冷循环次数增大而降低, 而微裂纹大小及数量随热冷循环次数增大而增大。热冷循环作用下花岗岩的损伤劣化机理包含了多次高温热损伤、水冷冲击及水弱化等 3 方面的联合作用结果。

参考文献(References):

- [1] BREEDE 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.
- [2] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Temperature-dependent mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments[J]. *Engineering Geology*, 2017, 229: 31–44.
- [3] 邓龙传, 李晓昭, 吴云, 等. 不同冷却方式对花岗岩力学损伤特征影响[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S1): 187–199.
DENG Longchuan, LI Xiaozhao, WU Yun, et al. Mechanical damage characteristics of granite with different cooling methods[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 187–199.
- [4] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Experimental investigation of quenching effect on mechanical, microstructural and flow characteristics of reservoir rocks: Thermal stimulation method for geothermal energy extraction[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 162: 419–433.
- [5] ANEKE M, WANG M H. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review[J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 350–377.
- [6] 赵鹏, 冯子军, 南翰墨, 等. 花岗岩干热岩体裂隙的大位移动态剪切-渗流特征[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1139–1154.
ZHAO Peng, FENG Zijun, NAN Hanmo, et al. Characteristics of large-displacement based dynamic shearing-flow through the fractures in the granitic hot dry rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(3): 1139–1154.
- [7] WU Q H, WENG L, ZHAO Y L, et al. On the tensile mechanical characteristics of fine-grained granite after heating/cooling treatments with different cooling rates[J]. *Engineering Geology*, 2019, 253: 94–110.
- [8] 李春, 胡耀青, 张纯旺, 等. 不同温度循环冷却作用后花岗岩巴西劈裂特征及其物理力学特性演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1797–1807.
LI Chun, HU Yaoqing, ZHANG Chunwang, et al. Brazilian split characteristics and mechanical property evolution of granite after cyclic cooling at different temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1797–1807.
- [9] JIN P H, HU Y Q, SHAO J X, et al. Influence of different thermal cycling treatments on the physical, mechanical and transport properties of granite[J]. *Geothermics*, 2019, 78: 118–128.
- [10] YU P Y, PAN P Z, FENG G L, et al. Physico-mechanical properties of granite after cyclic thermal shock[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(4): 693–706.
- [11] WENG L, WU Z J, LIU Q S. Influence of heating/cooling cycles on the micro/macroc cracking characteristics of Rucheng granite under unconfined compression[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(3): 1289–1309.
- [12] XU C, SUN Q. Effects of quenching cycle on tensile strength of granite[J]. *Géotechnique Letters*, 2018, 8(2): 165–170.
- [13] HOSSEINI M. Effect of temperature as well as heating and cooling cycles on rock properties[J]. *Journal of Mining and Environment*, 2017, 8: 631–644.
- [14] CHAPARRO C A, JIMÉNEZ O J, ESPITIA J M. Effect of wetting/drying and heating/cooling cycles on geomechanical behavior of mudrocks in the Lutitas de macanal formation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1386(1): 012055.
- [15] INADA Y, KINOSHITA N, EBISAWA A, et al. Strength and deformation characteristics of rocks after undergoing thermal hysteresis of high and low temperatures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3–4): 140. e1–140. e14.
- [16] ZHANG B, TIAN H, DOU B, et al. Macroscopic and microscopic experimental research on granite properties after high-temperature and water-cooling cycles[J]. *Geothermics*, 2021, 93: 102079.
- [17] BECATTINI V, MOTMANS T, ZAPPONE A, et al. Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal-energy storage[J]. *Applied Energy*, 2017, 203: 373–389.
- [18] RONG G, PENG J, CAI M, et al. Experimental investigation of thermal cycling effect on physical and mechanical properties of bed-rocks in geothermal fields[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 174–185.
- [19] 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): 1450–1465.
GU Qixiong, HUANG Zhen, ZHONG Wen, et al. Study on the variations of pore structure and physico-mechanical properties of gran-

- ite after high temperature cycling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(6): 1450–1465.
- [20] TAKARLI M, PRINCE W, SIDDIQUE R. Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw condition[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(7): 1164–1175.
- [21] VOAKE T, NERMOEN A, RAVNÅS C, et al. Influence of temperature cycling and pore fluid on tensile strength of chalk[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(2): 277–288.
- [22] ZHU D, JING H W, YIN Q, et al. Experimental study on the damage of granite by acoustic emission after cyclic heating and cooling with circulating water[J]. *Processes*, 2018, 6(8): 101.
- [23] GE Z L, SUN Q. Acoustic emission (AE) characteristics of granite after heating and cooling cycles[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 200: 418–429.
- [24] LIU H, ZHANG K, LIU T, et al. Experimental and numerical investigations on tensile mechanical properties and fracture mechanism of granite after cyclic thermal shock[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 8(1): 18.
- [25] GAUTAM P K, DWIVEDI R, KUMAR A, et al. Damage characteristics of jalore granitic rocks after thermal cycling effect for nuclear waste repository[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(1): 235–254.
- [26] WENG L, LI X B, TAHERI A, et al. Fracture evolution around a cavity in brittle rock under uniaxial compression and coupled static-dynamic loads[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(2): 531–545.
- [27] 吴秋红, 夏宇浩, 赵延林, 等. 不同温度及冷却速率下花岗岩动态拉伸力学特性[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 2179–2193.
- WU Qiuhong, XIA Yuhao, ZHAO Yanlin, et al. Effects of high temperature and cooling rate on dynamic tensile mechanical properties of granite[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 2179–2193.
- [28] 张洪伟, 万志军, 赵毅鑫, 等. 深层地热储层水力剪切增透机制研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3172–3185.
- ZHANG Hongwei, WAN Zhijun, ZHAO Yixin, et al. A review of the research on the mechanism of hydro-shearing in geothermal reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3172–3185.
- [29] MCDERMOTT C I, RANDRIAMANJATOSOA A R L, TENZER H, et al. Simulation of heat extraction from crystalline rocks: The influence of coupled processes on differential reservoir cooling[J]. *Geothermics*, 2006, 35(3): 321–344.
- [30] KIM K, KEMENY J, NICKERSON M. Effect of rapid thermal cooling on mechanical rock properties[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(6): 2005–2019.
- [31] FENG G, WANG X C, KANG Y, et al. Effect of thermal cycling-dependent cracks on physical and mechanical properties of granite for enhanced geothermal system[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 134: 104476.
- [32] YIN T B, LI Q, LI X B. Experimental investigation on mode I fracture characteristics of granite after cyclic heating and cooling treatments[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 222: 106740.
- [33] EBRAHIMI R, HOSSEINI M, TALEB BEYDOKHTI A. Experimental study of effect of number of heating-cooling cycles on mode I and mode II fracture toughness of travertine[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 117: 103185.
- [34] WANG L C, XUE Y, CAO Z Z, et al. Experimental study on mode I fracture characteristics of granite after low temperature cooling with liquid nitrogen[J]. *Water*, 2023, 15(19): 3442.
- [35] DEHGHANI B, FARAMARZI L. Experimental investigations of fracture toughness and crack initiation in marble under different freezing and thermal cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 220: 340–352.
- [36] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6): 773–781.
- [37] AYATOLLAHI M R, AKBARDOOST J. Size and geometry effects on rock fracture toughness: Mode I fracture[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 677–687.
- [38] ZHANG S, WANG H Y, LI X J, et al. Experimental study on development characteristics and size effect of rock fracture process zone[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 241: 107377.
- [39] 傅帅畅, 李海波, 李晓峰. 基于 DIC 方法与声发射的花岗岩断裂过程区范围研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(12): 2497–2508.
- FU Shuaiyang, LI Haibo, LI Xiaofeng. Research on the range of fracture process zone of granite based on DIC and acoustic emission[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2497–2508.
- [40] 安定超, 张盛, 张旭龙, 等. 岩石断裂过程区孕育规律与声发射特征实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(2): 290–301.
- AN Dingchao, ZHANG Sheng, ZHANG Xulong, et al. Experimental study on incubation and acoustic emission characteristics of rock fracture process zones[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(2): 290–301.
- [41] XING H Z, XIE F, WANG M Y, et al. Experimental investigation of fracture process zone of rock in dynamic mode I fracturing and its effect on dynamic crack initiation toughness[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 275: 108828.
- [42] LIN Q, WANG S Q, WAN B, et al. Characterization of fracture process in sandstone: A linear correspondence between acoustic emission energy density and opening displacement gradient[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(2): 975–981.
- [43] DUTLER N, NEJATI M, VALLEY B, et al. On the link between fracture toughness, tensile strength, and fracture process zone in anisotropic rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 201: 56–79.
- [44] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(1): 267–274.
- [45] YAVUZ H, DEMIRDAG S, CARAN S. Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks[J]. *International Journal of Rock*

- Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(1): 94–103.
- [46] 姜德义, 郭朋煜, 范金洋, 等. 升温速率对高温作用后砂岩的宏观性质影响[J]. *岩土力学*, 2022, 43(10): 2675–2688.
- JIANG Deyi, GUO Pengyu, FAN Jinyang, et al. Effect of heating rate on macro and mesoscopic properties of sandstone after high temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(10): 2675–2688.
- [47] ROSSI E, KANT M A, MADONNA C, et al. The effects of high heating rate and high temperature on the rock strength: feasibility study of a thermally assisted drilling method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(9): 2957–2964.
- [48] LIN Q, LABUZ J F. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60: 235–245.
- [49] SHEN Y J, HOU X, YUAN J Q, et al. Thermal cracking characteristics of high-temperature granite suffering from different cooling shocks[J]. *International Journal of Fracture*, 2020, 225(2): 153–168.
- [50] 杨仁树, 许鹏, 岳中文, 等. 圆孔缺陷与 I 型运动裂纹相互作用的试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1597–1602.
- YANG Renshu, XU Peng, YUE Zhongwen, et al. Laboratory study of interaction between a circular hole defect and mode I moving crack[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1597–1602.
- [51] 梁睿, 李传习, 聂洁, 等. 混杂纤维超高性能混凝土断裂性能研究[J]. *交通科学与工程*, 2022, 38(1): 43–54.
- LIANG Rui, LI Chuanxi, NIE Jie, et al. Research on fracture toughness of hybrid-fiber ultra-high performance concrete with steel fiber and different synthetic fibers[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2022, 38(1): 43–54.
- [52] 高桂云, 周洁, 励争. 脆性材料裂纹与损伤相互作用的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2650–2661.
- GAO Guiyun, ZHOU Jie, LI Zheng. Experimental study on the interaction of crack and defects of brittle materials under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2650–2661.
- [53] WU Q H, XIE C L, XIE Y S, et al. Extending application of asymmetric semi-circular bend specimen to investigate mixed mode I/II fracture behavior of granite[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(4): 1289–1304.
- [54] 左建平, 周宏伟, 范雄, 等. 三点弯曲下热处理北山花岗岩的断裂特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2422–2430.
- ZUO Jianping, ZHOU Hongwei, FAN Xiong, et al. Research on fracture behavior of Beishan granite after heat treatment under three-point bending[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(12): 2422–2430.
- [55] COLLIN M, ROWCLIFFE D. Analysis and prediction of thermal shock in brittle materials[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(8): 1655–1665.