

北山花岗岩热破裂室内模拟试验研究

陈世万¹, 杨春和^{1,2}, 刘鹏君³, 王贵宾², 魏翔¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 岩石热破裂是高放废物地质处置工程中需深入研究的课题。对我国高放废物重点预选场址甘肃北山的花岗岩开展室内热破裂模拟试验研究, 采用多通道温度测试仪、声发射、波速层析成像和数码显微镜等手段研究了该花岗岩热破裂过程。试验表明, (1) 热破裂从试件端部开始产生, 逐步向内缓慢扩展, 表现出分段性和独立性; (2) 根据声发射撞击率可将热破裂可分为稳定热损伤、宏观裂纹形成、宏观裂纹扩展、裂纹冷却闭合 4 个阶段, 声发射定位的时空演化规律清楚地揭示了裂纹从试件上端部向内部扩展的规律; (3) 波速层析成像指示了宏观裂纹位置及高温对岩石造成显著损伤的区域, 热应力产生的损伤集中在试件边界, 范围小, 损伤严重, 高温造成的损伤集中在钻孔附近高温区, 范围较大, 损伤略轻微; (4) 监测多通道温度, 获得了试件内的温度场并为数值模拟参数选取提供验证, 采用有限元程序进行了热力耦合数值模拟, 从机制上初步解释了热破裂现象, 研究认为综合声发射实时监测热破裂过程和波速层析成像能实现对热损伤的量化特性可实现岩石热破裂的动态监测和损伤量化, 为今后地下实验室相关试验的开展和认识高放废物处置长期稳定性做了有意义的探索。

关 键 词: 热破裂; 花岗岩; 声发射; 声波层析成像; 高放废物

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016) 增 1-0547-10

Laboratory simulation test of thermal cracking of Beishan granite

CHEN Shi-wan¹, YANG Chun-he^{1,2}, LIU Peng-jun³, WANG Gui-bin², WEI Xiang¹

(1. State key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Thermal cracking of rock is a critical subject in high radioactive waste disposal engineering. A laboratory simulation test was conducted to study the thermal cracking of Beishan granite. The temperature measuring device, acoustic emission (AE) system, ultrasonic computer tomography(CT) and microscope were applied to the test. The results show that the macrocracks originated at the outer edges of the specimen and then extended inward. The growth of cracks was mutational, and the latter cracks were suspected little impact of the former cracks. Four stages were observed during the test: stable thermal damage stage, macrocrack formation stage, macro-crack growth and the crack closure stage during cooling period. The evolution of AE locations reveals the growth of cracks' propagation process. The ultrasonic imaging of the cooled sample was obtained by the elastic wave CT. The cracks' positions and area suffered heat damage could be visualized in the CT imaging. The study shows that system combined AE and ultrasonic CT is effective to characterize the evolution of thermal-cracking process and quantify the damage. Temperature field obtained from a group of thermal couples can be used to verify the parameter for numerical simulation. The results of numerical simulation show that the high tensile stress at the time of macrocrack appearing is consistent with the tensile strength of Beishan granite. Thermal induced damage and thermal-mechanical induced crack are analyzed systematically, so as to provide reference for the future related tests conducted in underground laboratory.

Keywords: thermal cracking; granite; acoustic emission; ultrasonic imaging; high-level radioactive waste

1 引 言

地质处置是目前国际上公认可行的高放废物处

置方法^[1], 将高放废物经过初步处理后埋置于地下 500~1 000 m 范围内的地质体中。高放废物衰变过程中将释放大量的热, 使处置库内高放废物周围岩

收稿日期: 2015-11-09

基金项目: 高放废物地质处置地下实验室安全技术评价研究 (2014-2017年); 国家自然科学基金 (No. 51234004)。

This work was supported by the Research on Safety Technology Evaluation of Underground Laboratory for Geological Disposal of High Level Radioactive Waste (2014-2017) and the National Natural Science Foundation of China (51234004).

第一作者简介: 陈世万, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事高放废物地质处置岩石力学方面研究工作。E-mail: chswan01@163.com

体温度升高, 高达 240 °C^[2]。高温作用下岩体内不同矿物颗粒热膨胀的差异及温度梯度诱发的热应力, 可导致微裂纹的扩展, 诱导新裂纹, 改变岩体的物理力学性质, 影响处置库的长期安全性, 因此, 研究岩石热破裂有重要意义。

针对高放废物处置热问题, 国内外已开展了大量研究。Hudson^[3]综述了高放废物处置各阶段多场耦合的问题, 认为高放废物处置需深入认识处置库内多场耦合作用机制。Jansen 等^[4]开展了热破裂室内模拟试验, 研究了热破裂过程中声发射时空演化规律并研究了试件内波速场分布, 认为温度梯度是裂纹形成的最主要因素。Dwivedi 等^[5]总结了各国高放废地质处置预选场址花岗岩的热力特性, 为研究花岗岩的热力特性提供了参考。Menendez 等^[6]、David 等^[7]对比了热诱导裂纹和应力诱导裂纹的差异, 认为热诱导裂纹无明显方向性, 而应力诱导裂纹具有显著的方向性。Wang 等^[8]通过声发射、SEM 及差应变分析研究了 28、55 MPa 围压下 300 °C 内 Westerly 花岗岩的热破裂性质。加拿大 AECL 高放废物地下实验室开展了多项大型原位试验, 如 TSX、TMS 及 SHTF 研究项目, 研究热荷载下岩石损伤的发展及渐进破坏及其对围岩长期稳定性的影响^[9]。Guo 等^[10]针对 TSX 项目应用开发的有限元程序 MOTIF(model of transport in fractured/porous media)和 FLAC 模拟了岩体内长期温度场变化。Wanne^[11]对已开展的室内热破裂试验和 TSX 试验项目应用颗粒流程序进行热破裂模拟, 并与模拟试验结果进行了对比, 认为颗粒流程序能有效模拟热破裂过程。刘文岗等^[12]应用 FLAC3D 有限差分程序模拟了高放废物处置库数百年内热-力耦合条件下围岩温度场、应力场和变形场的演化特征, 并初步得出处置巷道工程设计和合理的巷道间距。张玉军^[13-15]建立了孔隙介质中热-水-应力-耦合弹塑性模型, 对假想的核废物处置库进行了模拟计算。唐春安等^[16]应用真实破裂过程软件 RFPA 分析了高放废物地质处置岩石的热破裂问题, 给出了渗流和温度条件下岩体结构破坏的一些分析结果。左建平^[17]通过岛津 SEM 全数字液压高温疲劳试验系统, 实时观察不同温度下北山花岗岩小试样的热开裂过程, 研究了热破裂裂纹的演化特征, 对含双预制缺口北山花岗岩进行原位观察热力耦合破坏试验^[18], 发现 75 °C 后花岗岩平均断裂韧性比 75 °C 之前降低 35% 左右, 可见温度对高放废物处置库长期安全性的影响不容忽视。

国内学者针对高放废物处置热问题也开展了数

值模拟及岩石基本热力性质的研究^[19-23], 对岩石的热损伤过程取得了较为深入的认识, 但热破裂模拟试验和现场试验鲜见报道, 对岩体内由温度梯度诱发热应力导致破裂的试验研究较少, 而这是将来地下实验室研究的重要组成部分。本文以我国高放废物处置库重要预选场址甘肃北山的花岗岩为研究对象, 开展室内热破裂模拟试验, 分析花岗岩热损伤及热破裂特征。本研究结果对于认识花岗岩的热破裂规律重要参考价值, 可为地下实验室相关试验和高放废物地质处置库长期稳定性评价提供参考。

2 试验设备及试验方法

2.1 试样准备

试样采自甘肃北山芨芨槽采石场, 原位切割成 500 mm×500 mm×500 mm 立方体, 在实验室内切割为 250 mm×250 mm×250 mm 和 200 mm×200 mm×200 mm 两个立方体试件, 编号分别为 BSG-THB01 和 BSG-THB02。通过 XRD 衍射分析获得试件的矿物成分为长石 60.59%, 石英 34.09%, 黑云母 5.32%。

为研究试验过程中试件内温度场的变化特征, 在 BSG-THB01 试件钻 4 个孔用以内置温度传感器, 如图 1 所示。钻孔过程中对试件通水以避免产生高温对试件造成热损伤, 其中 C1 孔内安装加热棒及控温热电偶, 孔径为 25 mm; C2~C4 孔内安装温度传感器, 孔径为 20 mm, C1~C4 孔深分别为 175、175、160、100 mm。BSG-THB02 主要用以研究试件加热过程中热破裂规律, 为减小对试件的扰动, 仅在试件中心钻一个加热孔, 孔径为 25 mm。

2.2 试验设备

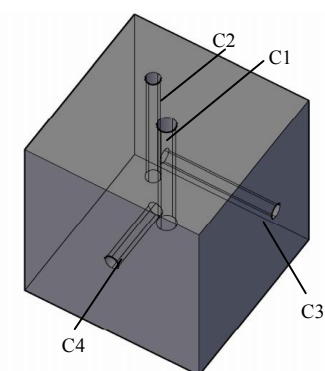
采用德国产 S 级高功率加热棒, 直径为 20 mm, 长 100 mm, 功率为 600 W, 最高工作温度为 900 °C。温度控制采用 YUDIAN AI 系列温控箱, 可编程控制加温速率, 本试验的工作条件下的控温精度为 ±5 °C。温度测量采用 SH-X 16 路温度测试仪, 配备 K 型玻璃纤维热电偶, 最高耐温 350 °C, 实时监测各传感器位置温度变化, 测温精度 ±2 °C。声发射监测采用美国 PAC 公司生产的 DISP 声发射监测系统, 波速测量采用 RSM-SY5 声波检测仪。采用 Dino-Lite AM4113T 数码显微镜观测试件端面的微观裂纹, 显微镜放大倍率为 20~50X、200X。

2.3 试验方法

2.3.1 设备及传感器安装

以 BSG-THB01 为例, 如图 2 所示, 加热棒和控温热电偶安装在中心孔内, 控温热电偶紧贴加热

棒, 为保证热量的传导, 为模拟高放废物处置实际情况, 采用膨润土填充钻孔和加热棒之间的空隙。温度传感器固定在钻孔获取的岩芯上, 置入钻孔内, 加入膨润土填充空隙, 以获得稳定的温度测量结果。试件表面布置 12 个声发射传感器, 传感器布置见图 2(b), 声发射各通道阈值设为 35 dB, 模拟滤波器为 100~400 kHz; *AE* 定时参数 PDT、HDT 和 HLT 分别为 50、100、300 μ s。



(a) BSG-THB01 示意图



(b) BSG-THB01 试件



(c) BSG-THB02 试件

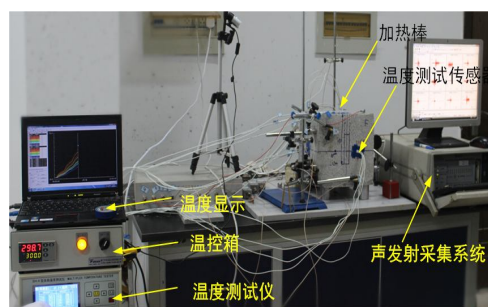
图 1 试件照片及钻孔布置示意图

Fig.1 Sketch of rock specimens and borehole layout

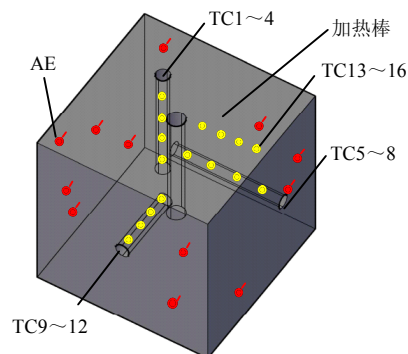
2.3.2 试验步骤

具体步骤:

① 测量试件初始波速和上端面细观初始裂纹分布, 按上述方式布置传感器和加热棒。温度传感器共 4 组, 每组 4 个通道, 分别布置在 C2~C4 钻孔和试件上端面。按图 2(b)布置声发射传感器。



(a) 室内热破裂试验照片



(b) 为试验中声发射、温度传感器和加热棒布置图

图 2 热破裂试验传感器布置图

Fig.2 Photograph of thermal-cracking test and arrangement of sensors

② 设置加温程序: 由室温 25 $^{\circ}$ C 开始加温, 按 5 $^{\circ}$ C/min 的加热速率加热至 100 $^{\circ}$ C, 恒温 60 min 以形成稳定的温度场, 按 5 $^{\circ}$ C/min 的加热速率加热至 200 $^{\circ}$ C, 恒温 60 min。按此方式加温至宏观裂纹充分扩展时停止加温。

③ 试件自然冷却, 记录冷却过程中声发射和裂纹的演化特征。

④ 试件冷却至室温后, 采用 RSM-SY5 对试件进行层析成像波速测量, 采用显微镜对试件上表面细观裂纹进行观测统计。

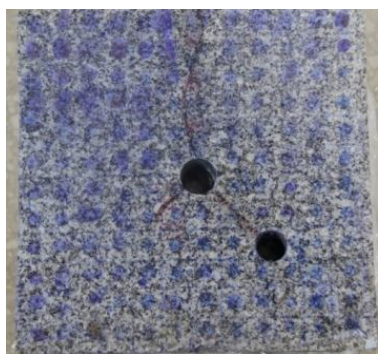
3 试验结果

按上述步骤进行试验发现, 两个试件均在 100 $^{\circ}$ C 开始出现声发射撞击, 可以认为热损伤从 100 $^{\circ}$ C 开始出现。BSG-THB01 在接近 600 $^{\circ}$ C 时开始大量出现声发射事件, 超过 600 $^{\circ}$ C 后出现宏观裂纹。BSG-THB02 在接近 500 $^{\circ}$ C 时开始大量出现声发射信号, 在 500~600 $^{\circ}$ C 加温段后期开始在试件上端部出现宏观裂纹, 见图 3。图中, 序号为裂纹产生的顺序。本阶段试件端部开始出现 1、2 号裂纹, 1 号裂纹长度为 30~40 mm, 2 号裂纹尚难以观察。600 $^{\circ}$ C 恒温阶段 1、2 号裂纹继续扩展, 并相继产生 3、4 号裂纹, 各条裂纹均从试件端部向内分段突变扩展,

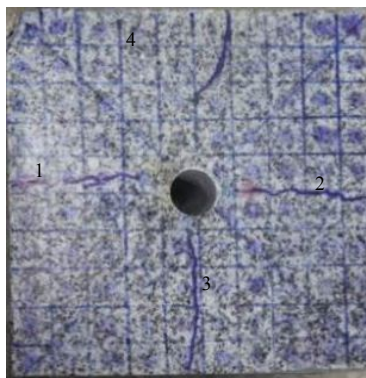
持续时间较长。与岩石力学试验裂纹互相影响不同,裂纹出现的位置和扩展方向不受之前裂纹的影响,表现出独立性。600℃恒温结束,冷却开始时裂纹达到最大值:1号裂纹端部最大隙宽约1 mm,长约85 mm,裂纹的长度和宽度按产生顺序逐减。冷却过程中裂纹逐渐闭合,持续时间约10 h。



(a) BSG-THB01 左端面裂纹



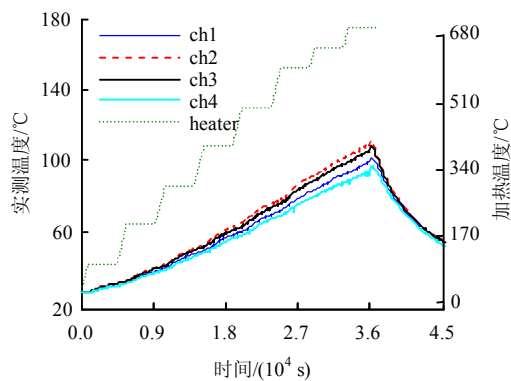
(b) BSG-THB01 上端面裂纹



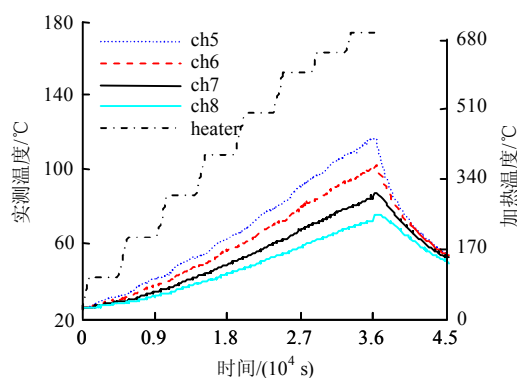
(c) BSG-THB02 上端面裂纹

图3 破坏后试件端面裂纹
Fig.3 Photographs of cracks

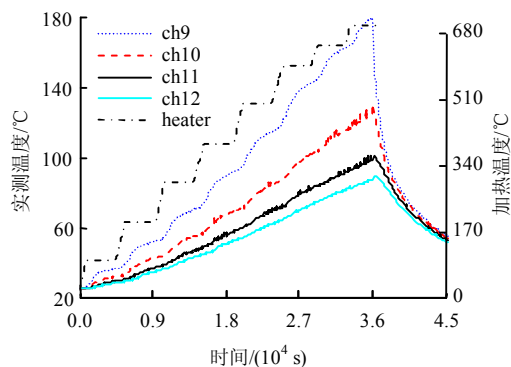
BSG-THB01 试件各个测点所测得的温度如图4 (heater 为加热器) 所示。需要指出,加热温度为加热棒表面温度,高于实际孔壁的温度,本文叙述采用加热棒温度分析热破裂过程,试件实际温度可通过数值模拟并对比所测得的温度进行综合分析得到。



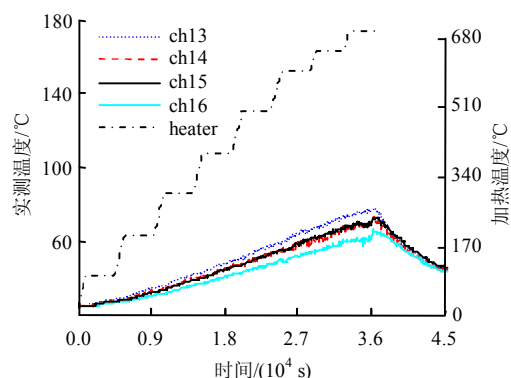
(a) 通道 1~4 温度测量结果



(b) 通道 5~8 温度测量结果



(c) 通道 9~12 温度测量结果



(d) 通道 13~16 温度测量结果

图4 各温度传感器测量结果
Fig.4 Results of temperature monitoring

3.1 声发射

3.1.1 声发射监测结果

BSG-THB02 试件在整个试验过程获得 10 万余

个声发射撞击, 图 5 为声发射撞击随温度的变化关系。100 °C 后开始出现较多的声发射撞击, 500 °C 之前, 每个温度梯度声发射撞击呈指数递增, 且恒温段声发射撞击率逐渐降低, 小于恒温段初始时的声发射率。这是由于温度梯度造成的热应力尚不足以诱导裂纹的不稳定扩展, 声发射是由高温对试件产生的稳定热损伤诱导的, 而在 500~600 °C 加温段声发射撞击率急剧升高, 且在恒温段并未停止增长趋势, 在 600 °C 恒温段持续 20 min 左右出现峰值, 声发射撞击增长速率显著增大和恒温过程中声发射撞击率继续增长是裂纹不稳定扩展形成宏观裂纹的标志。在降温过程中, 由于试件内温度场的缓慢改变, 未开裂部位热应力缓慢变化, 同时加热孔附近的高温持续对试件产生热损伤, 因此仍保持较高的声发射撞击率。

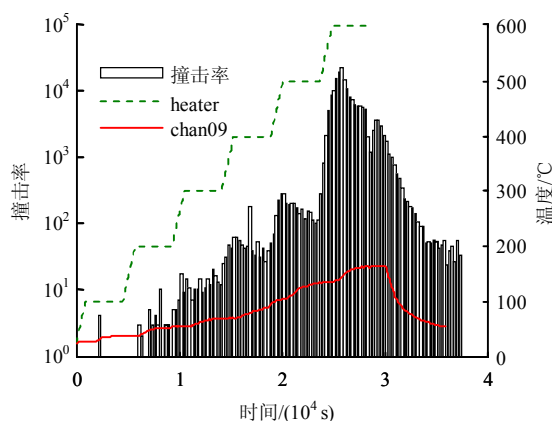


图 5 声发射撞击率随温度变化特征

Fig.5 Characteristics of AE rate changing with temperature

3.1.2 声发射定位时空演化规律

由于花岗岩不具有显著的各向异性, 且本试验无复杂的加载系统, 干扰信号少, 因此获得了高质量的声发射信号。对于较小试件, 声发射定位存在一定误差是不可避免的, 为分析声发射的时空演化规律, 声发射事件位置范围相对于试件范围略为放大, 如图 6 所示。400 °C 以前已出现大量声发射信号, 但本阶段声发射信号较弱, 尚不足以激发足够多的传感器以定义声发射事件, 因此 400 °C 以前无有效的声发射定位; 400~500 °C 阶段开始出现声发射事件, 其中多数声发射事件出现在 500 °C 恒温段, 见图 6(a)。此阶段声发射事件较少, 可以大致看出 1 号裂纹端部开始出现声发射聚集。500~600 °C 加温段声发射位置如图 6(b)所示, 此阶段声发射事件显著增加, 揭示了裂纹的位置和时空演化规律。在紧接着 1 号裂纹位置出现声发射事件后, 2 号裂

纹端部开始聚集声发射事件, 图中红色箭头表示为声发射定位的推进方向, 与裂纹扩展方向一致。随之产生 3 号裂纹; 600 °C 恒温段产生了大量的声发射事件, 此阶段按每 15 min 分为 4 个阶段。前 15 min 内 (见图 5(c)), 4 号裂纹处开始从端部出现声发射事件聚集, 并向内发展, 与前 3 条裂纹表现相同的演化规律; 各条裂纹处声发射位置均开始向内聚集 (红色椭圆标示了主要声发射聚集区域), 裂纹向内部发展, 同时在 $x-z$ 视图可观察到声发射事件尚主要集中在试件上端面。图 6(d)为 15~30 min 声发射事件定位, 如图中箭头指示, 聚集中心向从上端面向下部转移, 显示裂纹从试件上端面向内部发展。图 6(e)、6(f)分别为 600 °C 恒温阶段 30~45 min、45~60 min 声发射定位图。这两个阶段声发射事件数目逐渐减少, 仍明显地聚集在 4 条裂纹附近。

声发射的时空演化揭示了裂纹的扩展规律, 温度梯度形成的热应力诱导裂纹由试件上端部向内部扩展。400 °C 以前无声发射事件和声发射事件集中在裂纹附近, 而钻孔附近的高温区域并未有大量声发射事件聚集的现象, 均说明热破裂产生的声发射事件较小不足以难以激发足够多的声发射传感器, 单纯由热损伤引发的声发射能量小于应力诱发裂纹产生的声发射。

3.2 声波 CT

试验前对试件各方向进行了波速测试, 波速差异很小。对加热试验后的 BSG-THB02 试件进行声波层析成像, 测点布置如图 7 所示。将试样上部分为 4 层(L1~L4), 各层 4 个方向等间距布置 7 个测点, 分别进行声波 CT 成像测量。

对上述 4 层波速测试 results 在 Matlab 中编程进行层析成像, 获得 BSG-THB02 试件 L1~L4 波速慢度场, 如图 8 所示 (图中 s 为波速的倒数)。从 L1~L4 波速慢度场可看出, 4 个层面波速场分布大体一致。试件中部由于钻孔的存在, 各层均出现较低波速区, 证实了层析成像的有效性; 试件端部各条裂纹处均出现较低的波速, 表明试件在这些部位存在明显的损伤, 与试件外部观察到大隙宽裂纹的现象相符。图 8(a)~8(d)中, 1 号裂纹位置都出现较大面积的低波速区, 显示 1 号裂纹处试件受最为严重的损伤, 与图 6 中 1 号裂纹处聚集密集的声发射现象一致。试件各 CT 成像除左上边角 (该区域实际为在加工过程中造成的约为 1 cm 的缺口, 见图 4(c)) 外, 各边角区域为高波速区域, 受损伤最轻微。原因在于在这些区域温度较低不致诱导明的热损伤, 同时这些区域温度梯度诱发的热应力相对较小, 应

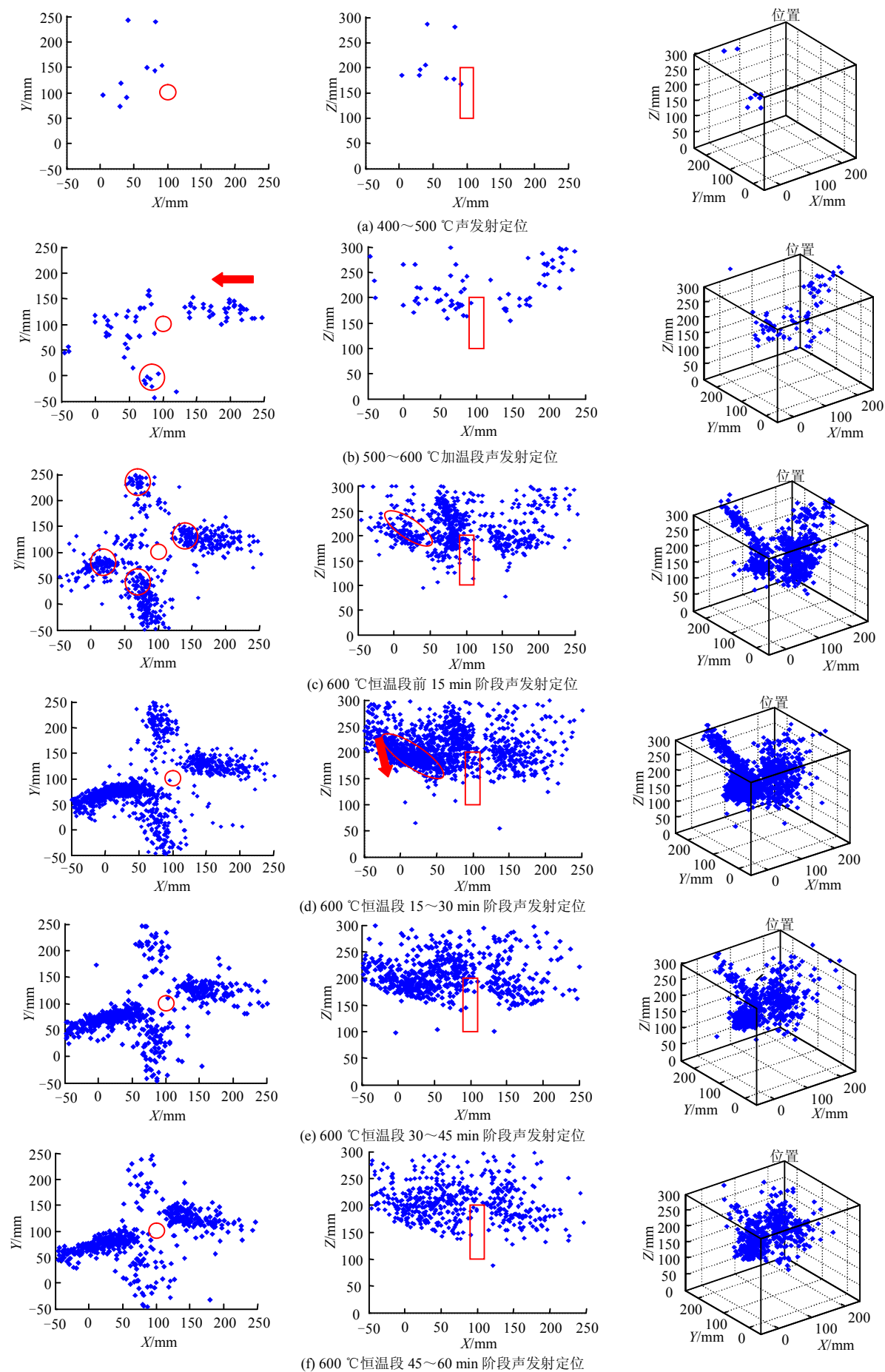


图 6 各阶段声发射时空演化
Fig.6 Spatiotemporal characteristics of AE locations

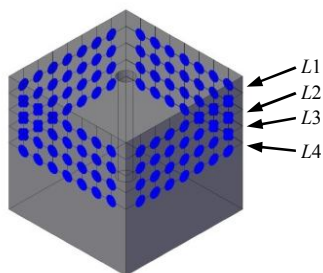


图 7 声波 CT 成像测点布置示意图

Fig.7 Sketch of ultrasonic imaging sensors layout

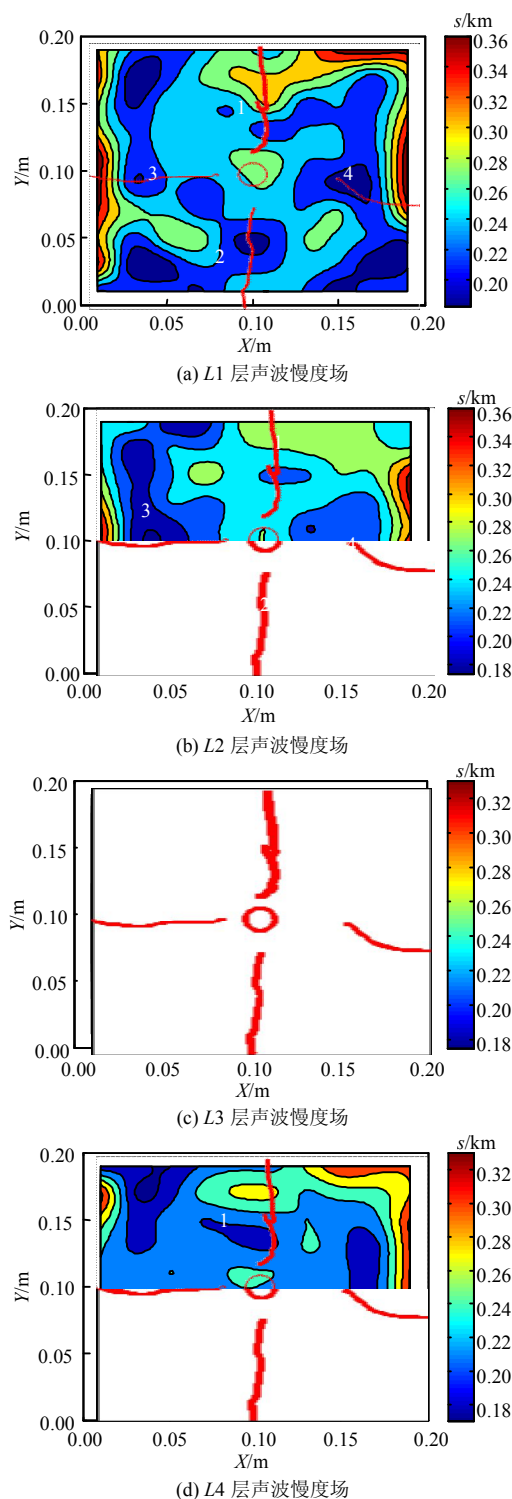


图 8 L1~L4 层声波层析成像

Fig.8 Slowness tomograms of layers L_1 - L_4

力诱导的损伤较小。

值得注意的是,除 1 号裂纹外各条裂纹中部均出现一个相对较高的波速区,显示该区域受到损伤较轻微。分析认为,这种现象是由于该区域距离热源较远,受热损伤较小,且在冷却过程中裂纹逐渐闭合,对波速影响较小。1 号裂纹处在试验中受显著的损伤,裂纹充分发展,导致裂纹中部无高波速区。试件内波速由上至下 4 层表现出递增的趋势,下部损伤弱于试件上部,进一步证实了裂纹从上至下演化顺序。

声波层析成像能有效地表征由热损伤和热应力对试件的损伤程度,能准确地指示热应力诱导的宏观裂纹位置及高温对岩石造成显著损伤的区域。冷却过程中裂纹逐渐闭合弱化了热应力诱导裂纹对波速场的影响,这也是热应力诱导热裂纹与应力诱导裂纹的不同之处。

3.3 裂纹密度

通过数码显微镜对加热后试件进行细观裂纹的观测和统计,为便于观察和统计表面裂纹,对试件上端面划分网格并染色,按网格的行列号对其编号,在显微镜下逐个统计各个网格内裂纹的数目。

花岗岩内热破裂多存在于颗粒边界、原始微裂纹和长石解理等试件内的软弱面。通过统计方格内观测点裂纹数,进行插值计算,获得加热后试件上端面新增裂纹密度图(见图 9)。由图可见,高裂纹密度区与宏观裂纹位置具有一定的相关性,中心位置附近区域内裂纹数目较高,认为该区域高密度裂纹主要由局部高温诱发。

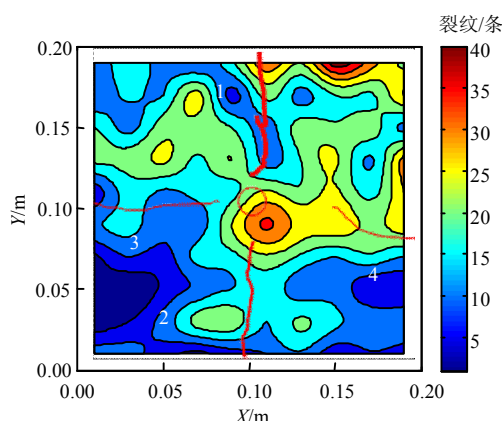


图 9 BSG-THB02 新生裂纹密度图

Fig.9 Cracks density on sample surface for BSG-THB02

4 分 析

4.1 热-力数值模拟

采用有限元程序 ANSYS 对本次试验进行热力

耦合模拟。试件不同位置温度差异大,为获得准确的模拟结果,需考虑温度对岩石的导热系数、比热、热膨胀系数的影响。参考国内外关于花岗岩物理热力性质的研究,对各参数进行线性拟合见表 1、2。按表内参数及实际的加温程序进行热力耦合模拟。

表 1 基本物理参数

Table 1 Physical parameters of granite for numerical simulation

温度 /℃	密度 (kg/m ³)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	导热系数 (W/m·℃)	比热 (J/kg·℃)
25	2 608	60	0.24	3.5	802
600	2 608	12	0.24	1.4	1 298

表 2 热膨胀系数

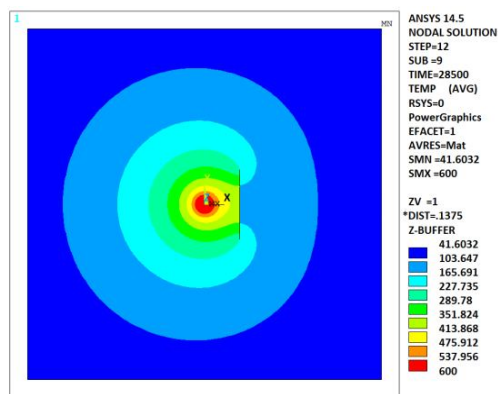
Table 2 Coefficient of expansion for numerical simulation

温度/℃	热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·℃)	温度/℃	热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·℃)
25	2.9	573	10
200	3.5	□573	0

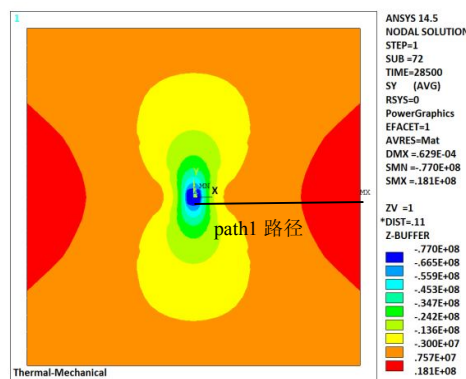
4.2 模拟结果分析

图 10(a)为 BSG-THB01 试件根据表内物理参数及加温程序模拟所得 600℃ 时的温度场,与各测点

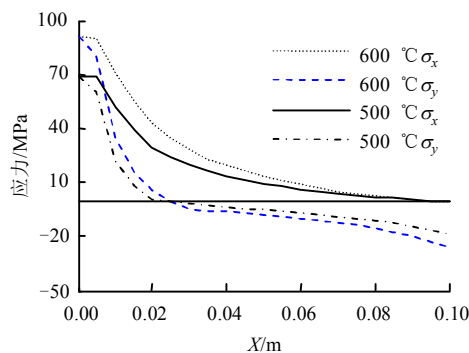
实际测得温度接近,证实模拟参数选取的合理性。试件内存在显著的温度梯度,超过 300℃ 的高温区仅存在中心较小范围内,这种温度分布与高放废物处置研究的情况相似,本试验得到的结论对地下实验室将开展的相关试验有一定参考价值。图 10(b)为 BSG-THB02 试件宏观破裂开始时 y 方向热应力场,试件中部受压,边界受拉。为研究热破裂试验中试件内应力演化,创建从钻孔到试件端部路径 path1,位置如 10(b)所示,并将热应力模拟结果映射到 path1 上。图 10(c)为 500℃ 和 600℃ 时 path1 路径上的应力, σ_y 由内向外从压应力逐渐减小并转为拉应力, σ_x 从内向外始终为压应力。这种应力分布解释了裂纹从试件端部产生,向内部扩展的现象。图 10(d)为试件端部最大拉应力随温度演化规律,即应力随着温度变化近似线性增长,加热棒加温梯度变化对边界应力无明显影响,恒温阶段温度持续向外传递使热应力持续增长;500~600℃ 加温段宏观裂纹出现时拉应力为 18.1 MPa,与试验所获得的北山花岗岩抗拉强度相当。数值模拟从机制上解释了热破裂的演化规律。



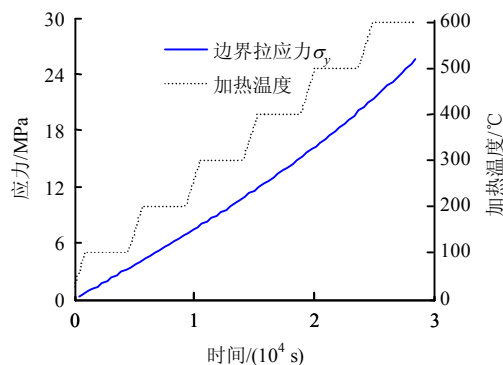
(a) 模拟温度场 (单位: °C)



(b) 热应力场 (单位: Pa)



(c) path1 路径 500℃ 和 600℃ 应力值



(d) 边界拉应力值演化规律

图 10 温度及应力模拟

Fig.10 Temperature and mechanical simulation

5 结 论

(1) 温度梯度诱发热应力导致裂纹从试件端部产生, 逐步向内扩展, 表现出分段性和独立性。

(2) 根据声发射撞击率可将热破裂分为稳定热损伤、宏观裂纹形成、宏观裂纹扩展和裂纹冷却闭合 4 个阶段, 声发射定位的时空演化清楚地揭示了裂纹从试件上端部向试件内部的扩展过程。

(3) 波速层析成像能准确地指示宏观裂纹的位置及高温对岩石造成显著损伤的区域, 冷却后裂纹闭合弱化了其对波速场的影响, 热应力产生的损伤集中在试件边界, 范围小, 损伤严重。高温造成的损伤集中在钻孔附近高温区, 范围较大, 损伤略轻微。综合声发射监测和波速层析成像可实现岩石热破裂的动态监测和损伤量化。

(4) 采用显微镜观察统计试件端面裂纹可知, 热破裂多产生于颗粒边界、长石解理面和原始缺陷等部位, 细观裂纹的密度分布与试件的损伤程度相关。

(5) 多通道温度监测获得了试件内的温度场, 为数值模拟参数选取提供验证。采用有限元程序对本试验进行了热力耦合数值模拟。模拟结果表明试件破裂时裂纹产生时端部最大拉应力为 18 MPa, 与北山花岗岩抗拉强度一致, 解释了裂纹从外部产生向内部扩展的过程。

参 考 文 献

- [1] 王驹, 陈伟明, 苏锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801—812.
WANG Ju, CHEN Wei-ming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(4): 801—812.
- [2] MARTIN R J I, BOYD P J, NOEL J S, et al. Creep in topopah spring member welded tuff. yucca mountain site characterization project[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Labs., 1995.
- [3] HUDSON J A. Coupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(1): 143—161.
- [4] JANSEN D P, CARLSON S R, YOUNG R P. Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced micro-cracks in Lac du Bonnet granite[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1993, 98(B12): 22231—22243.
- [5] DWIVEDI R D, GOEL R K, PRASAD V V R, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 96(6): 2383—2391.
- [6] DAVID C, MENÉNDEZ B, DAROT M. Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(4): 433—448.
- [7] MENÉNDEZ B, DAVID C, DAROT M. A study of the crack network in thermally and mechanically cracked granite samples using confocal scanning laser microscopy[J]. **Physics & Chemistry of the Earth Part A Solid Earth & Geodesy**, 1999, 24(7): 627—632.
- [8] WANG H F, BONNER B P, CARLSON S R, et al. Thermal stress cracking in granite[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1989, 94(B2): 1745—1758.
- [9] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1251—1275.
- [10] GUO R, CHANDLER N, MARTINO J, et al. Application of numerical modelling in the design of a full-scale heated tunnel sealing experiment[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2005, 29(12): 1171—1197.
- [11] WANNE T. Bonded-particle modeling of thermally induced damage in rock[D]. Toronto, Canada: University of Toronto, 2009.
- [12] 刘文岗, 王驹, 周宏伟, 等. 高放废物处置库花岗岩热-力耦合模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2875—2883.
LIU Wen-gang, WANG Ju, ZHOU Hong-wei, et al. Coupled thermo-mechanical analysis of granite for high-level radioactive waste repository[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 2875—2883.
- [13] 张玉军. 核废料地质处置近场热-水-应力-迁移耦合二维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1553—1557.
ZHANG Yu-jun. 2D FEM analysis for coupled thermo-hydro-mechanical-migratory process in near field of geological disposal of nuclear waste[J]. **Chinese**

- Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(10): 1553—1557.
- [14] 张玉军. 核废料处置概念库近场热-水-应力耦合模型及数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 17—22, 44.
ZHANG Yu-jun. Coupled thermo-hydro-mechanical model and relevant numerical analysis for near field of conceptual nuclear waste repository[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 17—22, 44.
- [15] 张玉军. 遍有节理岩体的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 947—955.
ZHANG Yu-jun. Coupled thermo-hydro-mechanical model and finite element analyses of dual-porosity fractured medium for ubiquitous-joint rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(5): 947—955.
- [16] 唐春安, 马天辉, 李连崇, 等. 高放废料地质处置中多场耦合作用下的岩石破裂问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3932—3938.
TANG Chun-an, MA Tian-hui, LI Lian-chong, et al. Rock failure issues in geological disposal of high-level radioactive wastes under multi-field coupling function[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3932—3938.
- [17] 左建平, 周宏伟, 方园, 等. 甘肃北山地区深部花岗岩的热开裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1107—1115.
ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, FANG Yuan, et al. Experimental research on thermal cracking of deep granite in Beishan region, Gansu province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1107—1115.
- [18] 左建平, 周宏伟, 方园, 等. 含双缺口北山花岗岩的热力耦合断裂特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 738—745.
ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, FANG Yuan, et al. Experimental research on fracture characteristics of double-notched Beishan granite under thermal-mechanical coupling effects[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 738—745.
- [19] 薛东杰, 周宏伟, 胡本, 等. 热力耦合作用花岗岩细观破坏强度及声发射规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2065—2074.
XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, HU Ben, et al. Thermal and mechanical coupling-induced mesoscale mechanism on failure strength and AE law of granite[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(9): 2065—2074.
- [20] 武晋文, 赵阳升, 万志军, 等. 高温均匀压力花岗岩热破裂声发射特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1111—1117.
WU Jin-wen, ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, et al. Experimental study of acoustic emission of granite due to thermal cracking under high temperature and isostatic stress[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(7): 1111—1117.
- [21] 张宁, 赵阳升, 万志军, 等. 高温作用下花岗岩三轴蠕变特征的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1309—1313.
ZHANG Ning, ZHAO Yang-sheng, WANG Zhi-jun, et al. Experimental study on triaxial creep properties of granite under high temperature[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(8): 1309—1313.
- [22] 冯子军, 赵阳升, 张渊, 等. 热破裂花岗岩渗透率变化的临界温度[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1987—1992.
FENG Zi-jun, ZHAO Yang-sheng, ZHANG Yuan, et al. Critical temperature of permeability change in thermally cracked granite[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(10): 1987—1992.
- [23] 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.