DOI: 10.11779/CJGE20230529

高温加热-液氮冷冲击处理后花岗岩声发射演化特征及 损伤本构模型

薛 熠¹,张智豪¹,刘 嘉^{*1},蔡承政²,张志镇²,高 峰²,时旭阳²,张 云²

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,

江苏 徐州 221116)

摘 要:通过液氮(LN2)压裂在储层中形成大规模裂隙网络,可以有效提高干热岩储层的热能提取效率。为研究液氮 冷冲击作用对不同温度储层的压裂机理和致裂效果的影响,对经过高温加热(25℃~400℃)和液氮冷冲击处理后的花 岗岩试样进行单轴压缩试验,分析了花岗岩力学强度及声发射等多项参数的演化特征,并进一步构建了考虑声发射参数的损伤本构模型,用于评价和预测高温加热-液氮冷冲击处理后花岗岩的变形和强度特征。结果表明:高温和液氮冷冲击的联合作用显著劣化了花岗岩力学性能,峰值强度逐渐降低,最大降幅达到 32.8%。同时随着加热温度的升高,不同矿物颗粒之间的热膨胀变形存在差异,导致矿物颗粒之间变形不协调。随着初始加热温度的升高,声发射最大 b 值 平均值显著上升,最大增幅达到 32.2%,且声发射振铃计数的初始静默阶段对应的应变量大幅度降低,最大降幅达到 54.3%。随着加热温度的升高,液氮冷冲击作用使得微裂纹的生长更为密集,花岗岩在外部荷载作用下,微裂隙不断扩展贯通,更容易形成剪切变形,发生剪切破坏的起始应力水平逐渐下降,最大降幅达到 62.3%,同时 R4-AF 散点值在剪切区域占比增加,最大增幅达到 29.5%。此外,本文以声发射振铃累计计数为变量构建了考虑声发射参数的损伤本构模型,能够描述不同高温和液氮冷冲击处理后花岗岩各力学参量在变形破坏过程中的演化特征。 关键词:花岗岩;声发射;高温加热-液氮冷冲击;损伤破坏;本构模型

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)09-1849-11 **作者简介:** 薛 熠(1989-)男,博士,副教授,主要从事煤岩体多场耦合理论的研究。E-mail: xueyi@xaut.edu.cn。

Acoustic emission evolution characteristics and constitutive model for damage of granite after high-temperature heating and liquid nitrogen cold shock treatment

XUE Yi¹, ZHANG Zhihao¹, LIU Jia¹, CAI Chengzheng², ZHANG Zhizhen², GAO Feng², SHI Xuyang², ZHANG Yun²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: By using the liquid nitrogen (LN₂) fracturing to create a massive network of fractures in the reservoir, the thermal energy extraction efficiency of hot dry rock reservoirs can be effectively improved. To investigate the effects of LN₂ cold shock treatment on the fracturing mechanism and fracture effects of reservoirs at different temperatures, the uniaxial compression tests are conducted on the granite samples undergone high-temperature heating ($25^{\circ}C \sim 400^{\circ}C$) and liquid nitrogen cold shock treatment. The evolution characteristics of the mechanical strength and acoustic emission parameters of granite are analyzed, and an acoustic emission constitutive model for damage of granite is further established to evaluate and predict the deformation and strength characteristics of parameters of high-temperature heating and liquid nitrogen cold shock treatment. The results indicate that the combined effects of high-temperature heating and LN₂ cold shock significantly degrade the mechanical properties of granite, with the gradual decrease in the peak strength and the maximum reduction of 32.8%. Meanwhile, with the increase in the heating temperature, there are differences in the thermal expansion deformation between different mineral particles, resulting in a lack of coordination in deformation between mineral particles. With the increase in the initial heating

temperature, the average maximum *b*-value of acoustic emission significantly increases, with the maximum increase of 32.2%, and the strain corresponding to the initial silent stage of

基金项目:国家自然科学基金项目(52274096,12202353,12002270) 收稿日期: 2023-06-12

^{*}通信作者 (E-mail: jliu@xaut.edu.cn)

acoustic emission ringing counts decreases significantly, with the maximum reduction of 54.3%. With the increase in the heating temperature, the LN_2 cold shock treatment causes the microcracks to grow more densely. Under the external loading, the microcracks continuously expand and penetrate, making it easier for the granite to undergo shear deformation and for the initial stress level of shear failure to gradually decrease, with the maximum reduction of 62.3%. Meanwhile, the proportion of *RA-AF* scatter plot values in the shear zone increases, with the maximum increase of 29.5%. Additionally, an acoustic emission constitutive model is established using the accumulated ringing counts as a variable, which can describe the evolution characteristics of different mechanical parameters of granite during the deformation and failure process after high-temperature heating and LN_2 cold shock treatment.

Key words: granite; acoustic emission; high-temperature heating-liquid nitrogen cold shock treatment; damage and failure; constitutive model

0 引 言

地热能是极具利用价值的清洁能源,在缓解能源 危机,改善生态环境方面发挥着重要作用^[1]。其中干 热岩(HDR)型地热能因其储量丰富、稳定、可靠和 耐用等特点引发了广泛关注。干热岩是一种高温岩体, 主要岩性为花岗岩,岩体致密,基本不含流体。由于 其低孔隙度和低渗透性等特点,干热岩储层中的地热 能资源很难被有效开发^[2]。因此,为了提高热提取效 率,通常采用增强型地热系统(EGS),通过水力压 裂的方式增加储层的渗透性和裂隙连通性^[3-4]。

与常规水力压裂相比,液氮压裂在储层内部建立 高渗透性裂隙通道方面具有独特的优势。液氮在常压 下能保持液态流动且制备容易,同时作为一种无水增 产技术,可以有效降低环境污染,避免水资源浪费^[5-6]。 干热岩储层的温度范围在 150℃~500℃^[7-8],液氮作 为一种低温流体(-195.8℃),液氮压裂的温差可达 350℃~700℃,冷冲击作用可以诱发地层内部的热裂 纹产生,形成大规模的裂隙网络,从而大幅度提升储 层压裂效率^[9-10]。

由于液氮的超低温属性,LN₂冷冲击作用诱导的 强烈热应力会对岩石的微观结构造成一定程度的破 坏,从而对岩石的物理力学性质产生影响,造成抗压 强度、抗拉强度、弹性模量等力学性能下降^[11-12]。低 温液氮可以通过制造次生裂纹、延长既有裂纹、促进 裂隙滑移等方式显著提升岩体的渗透性^[13-14]。Zhang 等^[15]提出通过液氮射流刺激干热岩储层,发现经过液 氮射流处理后,高温花岗岩热裂纹大量增加,且裂纹 数目和大小随着注入流体与岩石之间的温差增大而增 加。液氮对高温花岗岩的致裂作用主要是由于快速冷 却形成的热应力施加于岩体内部,破坏矿物颗粒之间 的胶结作用,致使微裂缝萌生、扩展、交叉,最终形 成大规模的裂隙网络^[16-17]。

声发射(AE)技术可以监测温度改变诱发热应力 造成的岩石内部缺陷和损伤演化过程^[18-19]。Sha 等^[20] 在热处理后的岩样单轴压缩试验中发现,热处理温度 低于 300℃,应力会出现略微下降的现象,且下降点 处的应变值对应的声发射计数急剧上升。由于孔隙水 蒸发,矿物颗粒错位或晶界运动导致瞬态应力松弛, 声发射信号活动剧烈。研究液氮冷冲击处理后岩石的 应力-应变关系及本构特征,对于干热岩储层的可压 裂性评价和压裂效果预测有着重要意义^[21-22]。刘泉声 等^[23]考虑到了弹性模量的演化过程,进而定义了热损 伤变量并推导出花岗岩的损伤本构方程,同时分析了 损伤能量释放率随温度的变化。蒋浩鹏等^[24]在现有岩 石统计损伤本构模型基础上,考虑微元体强度服从莫 尔-库仑准则,引入Weibull 分布函数和热损伤变量, 建立了适用于高温环境的岩石统计损伤本构模型。

本文对不同温度加热-液氮冷冲击处理后的花岗 岩进行单轴压缩试验研究,探讨了不同加热温度及液 氮冷冲击对花岗岩损伤破坏的影响。建立了高温加热-液氮冷冲击处理后花岗岩考虑声发射参数的损伤本构 模型,并基于试验数据对本构模型的适用性进行验证。 研究结果对液氮压裂技术在地热储层改造中的应用提 供了一定的试验参考依据。

1 试验材料及方法

1.1 试样制备

试验所采用的花岗岩取自江苏省徐州市,岩样表 面呈银白色并含黑斑,造岩矿物颗粒较粗,纹理均匀, 无可见缺陷。从矿区采出后,根据 ISRM 推荐的规范 对原岩进行钻取、切割、打磨等,最终制成高 100 mm, 直径 50 mm 的标准圆柱试样。为保证两端面的光滑平 整,对样品的端部进行了研磨抛光,平整度控制在 0.02 mm。试样均是从同一块岩块中钻取,具有良好的完 整性和均质性。

1.2 试验设备

单轴压缩试验所用仪器为 TAWD-2000 电液伺服 岩石力学性能测试系统(图 1)。通过该系统可以对 岩石进行多种力学试验。声发射采用的是 PCI-2 型声 发射系统,该系统是由美国物理声学公司(PAC)生 产,具有较为精准的信号探测能力,可用以实时监测 岩石内部损伤情况及裂纹发育动态。采用 XMA-2000 电热恒温干燥箱用于试样加热,其输出功率为 2000 W,控温范围为 RT+10℃-300℃,控温精度为±1%, 恒温波动度为±1℃。



图 1 TAWD-2000 试验系统加载设备

Fig. 1 Schematic diagram of TAWD-2000 test system

1.3 试验流程

试验流程包括 3 个部分:试样挑选;高温加热-液氮冷却处理;单轴压缩试验及声发射测试。

(1)标准圆柱试样制备后,利用 NM-4A 非金属 超声检测分析仪测量试样的纵波波速,挑选将波速相 近的试样分为一组,可减少试样自身结构差异造成的 试验误差。

(2)试样处理阶段,将花岗岩试样分为6组,前 5组中,一组试样放置于室温状态下(室温25℃)不 进行加热处理,剩余4组试样分别加热至100℃, 200℃,300℃和400℃,而后将5组试样均放入液氮 中进行冷却处理。最后一组作为常温对照组,不做加 热和冷却处理。花岗岩试样加热过程在XMA-2000电 热恒温干燥箱中进行。为避免加热引起的热冲击效应, 试验采用5℃/min的低加热速率,将岩样加热至预设 温度。达到目标温度后,恒温3h,确保充分加热。随 后将岩样从干燥箱内取出并立即浸入液氮罐中,在液 氮中冷却持续1h。待完全冷却后取出静置至常温。在 进行下一步测试前,所有样品在室温下自然风干24h。

(3)花岗岩试样处理完成后,利用 TAWD-2000 电液伺服岩石力学性能测试系统和 PCI-2 型声发射系 统进行单轴压缩及声发射试验。加载前将声发射探头 安装于试样侧面,进行六探头的分布安装,试样上下 两侧各 3 个探头均匀插空分布,任意两探头之间以 120°夹角定位,上下侧的探头距离试样上下端面分别 为10 mm。前置放大器增益设置为40 dB,门槛值为 35 dB,采样速率为4MSPS,撞击时间为50 μs,撞击 间隔为300 μs。单轴压缩试验以50 N/s 的速率施加轴 向压力,峰后阶段采用轴向变形控制方式进行加载, 加载速率设定为0.003 mm/s。加载过程中,计算机实 时记录位移载荷数据以及声发射数据。

2 高温加热-液氮冷冲击处理后的花岗 岩声发射参数分析

2.1 花岗岩声发射振铃计数特征

图 2 给出了高温加热-液氮冷冲击处理后花岗岩 在单轴试验压缩过程中的应力、声发射振铃计数、声 发射振铃计数演化特征。在弹性变形阶段,轴向应力-应变曲线以直线形式分布,声发射事件仍然较少。在 裂纹稳定扩展阶段,已经闭合的裂隙和微裂纹在轴压 的作用下开始扩展,声发射事件数开始增加,应力应 变曲线呈现出一定的非线性特征,但各项声发射参数 处于逐渐增长的状态在裂纹非稳定扩展阶段,花岗岩 内部的裂缝扩展加剧,甚至形成贯通裂纹,声发射信 号突增,承载能力降低。最终达到破坏阶段,花岗岩 内部裂隙扩大到无法承受轴向压力而崩落断裂,应力 急剧降低。通过图2可知, 随着加热温度由25℃增加 到 400℃,花岗岩试样峰值强度逐渐降低,下降幅度 达到 32.8%。随着加热温度的升高,热破裂使花岗岩 内部结构发生劣化,降低其力学强度。加热温度由 100℃增加到 200℃时,峰值强度略有增加,可能是由 于热膨胀变形和部分晶体熔化使花岗岩内部结构变得 紧密,导致原始微裂纹闭合,提高了花岗岩的承载能 力。此外,从图2中发现随着加热温度由25℃增加到 400℃,声发射振铃计数的静默阶段所对应的应变值逐 渐变短,缩短约 54.3%。证明在岩样初始加载阶段就 更容易检测到显著的声发射信号,也进一步说明温度 梯度越大,液氮冷冲击可以有效加速微裂纹在储层中 的扩展、交汇、贯通。







2.2 声发射 b 值分析

*b*值分析是一种常见的岩石声发射特性分析手段, 其概念最早由 Gutenberg 等^[25]于 1941 年提出,最先用 于地震学研究,来描述地震频度随震级按指数减少的 规律,提出的 G-R 关系式如下所示:

$$\lg N = a - bM \quad . \tag{1}$$

式中: N 为地震次数; M 为地震震级; a, b 为常数。 在计算声发射 b 值时, 通常以声发射的振幅值除以 20 来代替地震的震级 M^[26]。对于 N, 通过选取振幅大于 A 的特定时间窗口中的声发射命中次数来进行表示, 其中 A 为声发射振幅值。

为确定 b 值,可在每个采样窗口中选取相等数量 的声发射事件。b 值的误差随着样本数量的增加而降 低^[27]。Pickering 等^[28]认为选取样本大于 200 个事件, b 值就接近于最小误差。为了保证 b 值的可靠性,本文 选取 500 个声发射事件作为滑动时间窗口来计算 b 值。 通过对高温加热-液氮冷冲击处理后的花岗岩声发射 b 值进行统计,得出了图 3 中不同工况下的变化情况。







temperature heating-liquid nitrogen cold impact treatment

图 3 为高温加热-液氮冷冲击处理后的花岗岩 b 值变化情况。随着应力水平的增加,各温度下花岗岩 的声发射 b 值变化均呈现出上升-平缓-下降的一个分 布趋势。当应力水平增加到 20%左右时,b 值总体处 于上升状态,此时花岗岩中的微裂隙和微裂纹开始逐 渐增多,对应于初始压密阶段。当应力水平达到 20%~ 80%,b 值呈现振荡分布的特征,但总体趋于缓慢增 加状态,维持在 1.3~1.4。加热温度越高,花岗岩声 发射 b 值的振荡幅度越剧烈,即高温和冷冲击使得花 岗岩内部破裂加剧,裂隙发育更密集,大量微裂缝形 成且有大裂缝及贯通裂纹生成,对应于弹性变形、裂 缝稳定发展以及裂缝非稳定发展阶段。由于液氮冷冲 击造成岩体内部结构微劣化,其损伤情况相较于未经 过处理的岩样要更加严重,未处理岩样的b 值水平略 低于高温-液氮冷冲击处理后的试样。当应力水平超过 80%, 宏观裂隙的占比迅速增加, b 值下降。

为了更加直观展现 b 值随加热温度的演化特征, 分析了最大 b 值及整体 b 值与加热温度之间的对应关 系。其中,最大 b 值根据不同应力阶段 b 值的最大值 确定,整体 b 值通过试样的整体数据计算确定。为保 证其准确性,采用多个试样 b 值的平均值来确定。最 大 b 值在 25℃~300℃处于增大状态,上升 12.7%, 300℃~400℃上升趋势更大,上涨 19.5%。整体 b 值 与最大 b 值的变化趋势情况相似,在 25℃~300℃上 升 6.9%, 300℃~400℃,上涨 10.1%。

2.3 声发射 RA、AF 值分析

声发射 RA-AF 值可用来表征花岗岩破坏过程中 裂纹扩展的方式。RA 是上升时间与最大幅值之间的比 值。当 RA 值越大,则声发射波形达到相同幅值所需 要的上升时间就会更长,当 RA 值越小,在同等的上 升时间过程中,声发射波形幅值增长速度就会更快。 AF 值是振铃计数和持续时间的比值。当 AF 值越大, 则在同一持续时间的声发射振铃计数越多,当 AF 值 越小,则达到相同振铃计数所用的持续时间越长。利 用其可以区分拉伸裂纹和剪切裂纹。

图 4 为高温加热-液氮冷冲击处理后的花岗岩在 加载条件下的 RA 和 AF 值演化特征。当 RA 超过 AF, 表明岩石内部的破裂以剪切裂隙为主。当 RA 小于 AF, 表明岩石内部的破裂以张拉裂隙为主。 BA 曲线与 AF 曲线的首次交汇点意味着岩石内部破裂模式的变化。 随着加热温度的升高, RA 曲线与 AF 曲线的首次交汇 点对应的应力水平越来越低。从 25℃工况下的 61%逐 渐降低至 400℃工况下的 23%,表面随着加热温度的 升高,在低应力水平条件下就会出现了较多剪切微裂 纹,导致试样更容易发生局部剪切破坏,从而诱发试 样的宏观整体破坏。同时可以看到在大部分工况下, RA 曲线与 AF 曲线的首次交汇后又出现了多次交汇, 最终在应力峰值处呈现高 RA 低 AF 状态,预示了内部 破裂模式的复杂演化特征以及最终的剪切破坏模式。





图 4 加载期间高温加热─液氮冷冲击处理后的花岗岩 RA 和 AF 值变化

Fig. 4 Changes in *RA* and *AF* values of granite during loading after high temperature heating-liquid nitrogen cold impact treatment 图 5 给出了高温加热-液氮冷冲击处理后的花岗 岩加载期间 RA 和 AF 值的散点分布情况。对 RA 和 AF 值进行了归一化处理,根据 RA-AF 的数值确定最 佳过渡线,并划分出拉伸破坏区域和剪切破坏区域, 对花岗岩试样的主要破坏形式进行比对分析。不同工况 下的试样散点分布趋势有着明显变化。随着加热温度的 升高,大部分散点分布逐渐从拉伸破坏区域转变到剪切 破坏区域。其剪切破坏区域散点分布数量由 25℃工况 下的 57.7%上升为 400℃工况下的 91.2%。即加热温度 越高,花岗岩内部的损伤破坏越严重,产生的微裂纹更 多,而微裂纹的增多更容易造成宏观破坏的发生。





图 5 高温加热-液氮冷冲击处理后的花岗岩移动平均 RA 和 AF 值归一化散点图

Fig. 5 Normalization scatter plot of moving average *RA* and *AF* values of granite after high-temperature heating and liquid nitrogen cold shock treatment

3 加热-液氮处理后考虑声发射参数的 损伤本构模型

花岗岩的强度和变形等力学性质会受到内部裂隙、节理等因素的影响。声发射系统可以对加载过程 中花岗岩试样的内部损伤破坏进行实时记录。本试验 在加载过程中对声发射振铃计数、应变、应力等数据 进行同步监测,根据应变ε与时间 *t* 的拟合情况得出 两者为线性关系,表示为

$$\varepsilon = kt + \varepsilon_0 \quad . \tag{2}$$

式中: *k* 为花岗岩应变率; *ε*₀ 为花岗岩初始应变,两个参数均可通过线性拟合得到。

对花岗岩声发射振铃累计计数 N 与时间 t 曲线进 行数据拟合,损伤情况下花岗岩的声发射振铃累计计 数与时间的函数关系可以采用指数函数进行表征,此 时 N 与 t 的函数关系可表示为

$$N = A_{\rm l} \exp(B_{\rm l}t) + C \quad . \tag{3}$$

式中: A_1 , B_1 ,C均为参数,由试验数据拟合得到。

由式(2),(3)联立,得到声发射振铃累计计 数与应变的耦合关系,表示为

$$N = A_1 \exp\left(\frac{B_1(\varepsilon - \varepsilon_0)}{k}\right) + C \quad . \quad (4)$$

根据 Lemaitre 应变等价性假说,可以将单轴压缩 条件下的损伤本构模型表示为

$$\sigma = E\varepsilon(1-D) \quad . \tag{5}$$

式中: σ 为有效应力;E为材料初始弹性模量; ε 为 应变;D为损伤因子。

假设连续性材料的微元强度满足 Weibull 分布,即

$$\Phi(\varepsilon) = \frac{m}{\alpha} \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{m}\right] \quad . \tag{6}$$

式中: *m* 为 Weibull 分布的形状参数, α 为 Weibull 分布的尺寸参数。

损伤变量 D 与微元破坏的概率密度关系:

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}\varepsilon} = \Phi(\varepsilon) \quad . \tag{7}$$

由式(6)和式(7)得

$$D = \int_0^{\varepsilon} \Phi(\varepsilon) d\varepsilon = 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon^m}{\alpha}\right) \quad . \tag{8}$$

将式(8)代入式(5),得花岗岩应力-应变本构 模型:

$$\sigma = E\varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^m}{\alpha}\right) \quad \circ \qquad (9)$$

其中,参数 m, α 通过试验数据拟合得到。

联立式(4), (9), 得到声发射累计计数N与 应变 ε , 应力 σ , 损伤因子D之间的耦合关系:

$$\sigma = E\varepsilon \exp\left[-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{k}{B_1} \ln \frac{N-C}{A_1} + \varepsilon_0\right)^m\right] \quad , \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{k}{B_1} \ln \frac{N - C}{A_1} + \varepsilon_0 \quad , \tag{11}$$

$$D = 1 - \exp\left[-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{k}{B_1} \ln \frac{N-C}{A_1} + \varepsilon_0\right)^m\right]$$
(12)

为了检验模型的正确性及合理性,采用试验数据 进行验证。将试验数据带入模型,得到相关参数,如 表1所示。并进一步确定花岗岩声发射振铃累计计数 与应力、损伤之间的关系,如图6,7所示。

应力-声发射振铃累计计数试验结果与本构模型 计算结果在峰前阶段有较好的一致性。同时,损伤变 量曲线符合实测数据的变化情况。在达到屈服极限前, 花岗岩破坏过程中包括压密和弹性变形两个阶段。这 两个阶段的压缩变形状态比较稳定,具有一定的可预 测性,因此在峰前阶段的曲线吻合度较高。峰后阶段, 花岗岩出现了明显的宏观破裂,导致了声发射变化的 表 1 Weibull 分布与拟合参数表

Table 1 Parameters for Weibull distribution and fitting								
试样编号	处理措施	Weibull 分布		拟合参数				
		т	α	A_1	B_1	С	k	\mathcal{E}_0
Untreated -1	不处理	-1.78	1.22	0.7261	0.3036	-26.6	0.07659	-0.3779
Untreated-2		-1.59	1.43	0.9654	0.5638	-17.9	0.08867	-0.4738
25-1	25°C+LN ₂	-1.445	6.357	1.48054	0.01243	-5.88255	0.00166	0.14985
25-2		-1.636	47.82	11.41	1.194	-7.369E-06	0.04658	0.4986
100-1	100°C+LN ₂	-0.431	68.16	4.762E-05	2.872	-4.167E-08	0.1558	-0.01105
100-2		-0.699	59.73	4.085E-06	0.9768	-9.886E-05	0.02678	-0.0271
200-1	200°C+LN ₂	-1.511	26.63	0.59994	0.01529	-5.02845	0.00166	-0.01004
200-2		-1.194	47.75	0.2855	0.08134	-2.692E-08	0.003706	0.4613
300-1	300°C+LN ₂	-0.7796	-11.18	66.98773	0.00184	-74.97969	0.0016	-0.08416
300-2		32.54	13.49	0.6103	0.7746	-0.483	0.09329	0.2313
400-1	400°C+LN ₂	-1.162	37.31	1.051	0.8312	-0.4491	0.1164	0.167
400-2		-1.503	25.91	21.03	0.2642	-0.489	0.02983	0.6208



图 6 高温加热-液氮冷冲击处理后的花岗岩破坏 σ 与N关系

Fig. 6 Relationship between σ and N of granite failure after high-temperature heating and liquid nitrogen cold shock treatment







 Fig. 7 Relationship between D and N of granite failure after high-temperature heating and liquid nitrogen cold shock treatment

 随机性也增大,此时本构模型计算结果与实测数据有

 一定的差异。

 参考文献:

试验数据与模型数据的比对表明,应力-声发射振 铃累计数关系曲线在应力峰值之前具有较好的一致 性。总体而言,花岗岩应力-声发射振铃累计计数与模 拟的吻合度及相关性较好,证明了所建模型的合理性 与有效性。

4 结 论

第9期

(1)当加热温度在 25℃~400℃时,经过高温-液氮处理后的花岗岩力学强度逐渐弱化,峰值应力下 降 32.8%,主要是由于热应力与冷冲击对花岗岩的劣 化产生较大的影响,影响作用会随着温度的增加变得 更加显著。

(2)对于花岗岩内部损伤情况,可以用声发射 参数进行描述。当高温-液氮冷冲击的加热温度在 25℃~400℃时,花岗岩声发射最大 b 值平均值上升 32.2%,声发射振铃计数的静默阶段所对应的应变值 缩短 54.3%。同时发生剪切破坏的起始应力水平下降 了约 62.3%。*RA-AF* 的散点在剪切区域占比增加了 33.5%。该现象主要是由于高温使得花岗岩内部产生 热应力,加上液氮冷冲击破坏其内部结构产生大量微 裂缝造成。根据 *RA-AF* 散点图,剪切破坏区域中的散 点数量随着加热温度的升高而增加,即发生剪切破坏 的事件增多。

(3)根据试验所得花岗岩各项力学参数及声发 射参量,得出声发射累计振铃计数、应变与时间的拟 合关系,进而推导出花岗岩声发射振铃累计计数与应 变之间的关系函数。同时结合连续损伤力学基本理论, 提出了高温加热-液氮冷冲击条件下考虑声发射参数 的花岗岩损伤本构模型。并利用试验数据验证了模型 的可行性与准确性。

- 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 Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9. (in Chinese))
- [2] 李德威, 王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015(11): 1858-1869.
 (LI Dewei, WANG Yanxin. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015(11): 1858-1869. (in Chinese))
- [3] 廖志杰,万天丰,张振国. 增强型地热系统: 潜力大、开发 难[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 335-344. (LIAO Zhijie, WAN Tianfeng, ZHANG Zhenguo. The enhanced geothermal system(EGS): huge capacity and difficult exploitation[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 335-344. (in Chinese))
- [4] 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 等. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1139-1152. (XU Tianfu, YUAN Yilong, JIANG Zhenjiao, et al. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: international experience and China prospect[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1139-1152. (in Chinese))
- [5] 曾义金. 干热岩热能开发技术进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(2): 1-7. (ZENG Yijin. Technical progress and thinking for development of hot dry rock (HDR) geothermal resources[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(2): 1-7. (in Chinese))
- [6] BOUDET H, CLARKE C, BUGDEN D, et al. "Fracking" controversy and communication: Using national survey data

to understand public perceptions of hydraulic fracturing[J]. Energy Policy, 2014, **65**: 57-67.

- [7] 尹欣欣,蒋长胜,翟鸿宇,等. 全球干热岩资源开发诱发 地震活动和灾害风险管控[J]. 地球物理学报, 2021, 64(11): 3817-3836. (YIN Xinxin, JIANG Changsheng, ZHAI Hongyu, et al. Review of induced seismicity and disaster risk control in dry hot rock resource development worldwide[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(11): 3817-3836. (in Chinese))
- [8] 董 硕,沙 松,蒙世仟,等.液氮冷却作用下三类高温岩 石力学性能试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(11): 1591-1599. (DONG Shuo, SHA Song, MENG Shiqian, et al. Experimental investigation of mechanical properties of three types of high temperature rocks after liquid nitrogen cooling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(11): 1591-1599. (in Chinese))
- [9] SU S, HOU P, GAO F, et al. Changes in mechanical properties and fracture behaviors of heated marble subjected to liquid nitrogen cooling[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 261: 108256.
- [10] 吴星辉,李 鹏, 郭奇峰,等. 热损伤岩石物理力学特性 演化机制研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(5): 827-839. (WU Xinghui, LI Peng, GUO Qifeng, et al. Research progress on the evolution of physical and mechanical properties of thermally damaged rock[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(5): 827-839. (in Chinese))
- [11] ENAYATPOUR S, PATZEK T. Thermal shock in reservoir rock enhances the hydraulic fracturing of gas shales[C]// SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, OnePetro, 2013.
- [12] FINNIE I, COOPER G A, BERLIE J. Fracture propagation in rock by transient cooling[C]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Pergamon, 1979, 16(1): 11-21.
- [13] WU X G, HUANG Z W, SONG H Y, et al. Variations of physical and mechanical properties of heated granite after rapid cooling with liquid nitrogen[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(7): 2123-2139.
- [14] 蔡承政,李根生,黄中伟,等. 液氮压裂中液氮对岩石破坏的影响试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 98-103. (CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Experimental study on effect of liquid nitrogen on rock failure during cryogenic nitrogen

fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, **38**(4): 98-103. (in Chinese))

- [15] ZHANG S K, HUANG Z W, ZHANG H Y, et al. Experimental study of thermal-crack characteristics on hot dry rock impacted by liquid nitrogen jet[J]. Geothermics, 2018, 76: 253-260.
- [16] 张 伟,曲占庆,郭天魁,等. 热应力影响下干热岩水压 致裂数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 2001-2008.
 (ZHANG Wei, QU Zhanqing, GUO Tiankui, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing in hot dry rocks under the influence of thermal stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 2001-2008. (in Chinese))
- [17] 黄中伟,位江巍,李根生,等. 液氮冻结对岩石抗拉及抗 压强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 694-700, 834. (HUANG Zhongwei, WEI Jiangwei, LI Gensheng, et al. An experimental study of tensile and compressive strength of rocks under cryogenic nitrogen freezing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 694-700, 834. (in Chinese))
- [18] YUAN H, SUN Q, GENG J, et al. Acoustic emission characteristics of high-temperature granite through different cooling paths[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022, 8(3): 97.
- [19] 郭奇峰, 钱志海, 潘继良, 等. 高温花岗岩热冲击后力学 特性及损伤演化规律研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1746-1754. (GUO Qifeng, QIAN Zhihai, PAN Jiliang, et al. Mechanical properties and damage evolution of granite under high temperature thermal shock[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1746-1754. (in Chinese))
- [20] SHA S, RONG G, CHEN Z H, et al. Experimental evaluation of physical and mechanical properties of geothermal reservoir rock after different cooling treatments[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(11): 4967-4991.
- [21] GAUTAM P K, VERMA A K, SHARMA P, et al. Evolution of thermal damage threshold of jalore granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(9): 2949-2956.
- [22] 陈世万,杨春和,刘鹏君,等. 热损伤后北山花岗岩裂隙 演化及渗透率试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1493-1500. (CHEN Shiwan, YANG Chunhe, LIU Pengjun, et al. Evolution of cracks and permeability of granites suffering from different thermal damages[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1493-1500. (in Chinese))

Bulletin of the Seismological Society of America, 1956,

46(2): 105-145.

- [23] 刘泉声,许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 408-411. (LIU Quansheng, XU Xichang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 408-411. (in Chinese))
- [24] 蒋浩鹏,姜谙男,杨秀荣.基于 Weibull 分布的高温岩石 统计损伤本构模型及其验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1894-1902. (JIANG Haopeng, JIANG Annan, YANG Xiurong. Statistical damage constitutive model of high temperature rock based on Weibull distribution and its verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1894-1902. (in Chinese))
- [25] GUTENBERG B, RICHTER C F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper)[J].

[26] LIU X, HAN M, HE W, et al. A new b value estimation method in rock acoustic emission testing[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(12): e2020JB019658.

- [27] CHEN D, LIU X, HE W, et al. Effect of attenuation on amplitude distribution and b value in rock acoustic emission tests[J]. Geophysical Journal International, 2022, 229(2): 933-947.
- [28] PICKERING G, BULL J M, SANDERSON D J. Sampling power-law distributions[J]. Tectonophysics, 1995, 248(1/2): 1-20.

第二届环境、地质与岩土工程国际研讨会(第1号通知) (中国·杭州 2024年11月9日)

地球岩土体是重大工程承载体,矿产资源赋(储)存体和 人类废弃物处置场所。地质环境与重大工程相互关联和制约, 特别是全球气候变化导致其关联性更为复杂,若干新兴交叉学 科或研究方向应运而生,以保障重大工程安全和保护生态地质 环境。本研讨会旨在为这些领域的科学家、工程师及相关专业 人员搭建一个交流平台,以促进环境、地质、岩土工程等学科 的交叉融合、助力岩土工程与地质环境的可持续发展!本年度 论坛主题聚焦深地工程、深海工程和岩土地震工程。

论坛主题:深地工程、深海工程、岩土地震工程。

交流议题:①环境、地质与岩土工程相互作用机制;②环 境、地质与岩土工程超重力物理模拟;③废弃物深地处置;④ 深地能源开发与储存;⑤海洋岩土工程与地质灾害;⑥深海天 然气水合物开采及灾变防控;⑦西部重大工程岩土地震灾害防 控;⑧其它。

主办单位:浙江大学超重力研究中心;软弱土与环境土工 教育部重点实验室。 组织方式:本论坛大会报告以邀请报告和现场讨论方式交流,按论坛议题设置10个大会报告,报告之后设置讨论环节, 会后整理形成论坛交流成果。并设有四个平行分会场,针对深 地工程、深海工程、岩土地震工程等开展交流。

会议注意事项:报名网址:https://www.zjuyh.com/2024ISEGGE/ n1,会议费:正式代表 2000 元/人,学生代表 1500 元/人。线 上付款支持微信、支付宝,本次会议费委托杭州启真会展服务 有限公司收取并开具增值税普通电子发票,对公转账户名:杭 州启真会展服务有限公司,开户行:中国农业银行(杭州紫金 港支行),银行账号:19042201040001616,对公汇款时请务必 在附言中注明"参会人姓名+第二届岩土工程"。

联系方式: 学术服务徐文杰 13656810920, wenjiexu@zju. edu.cn; 会议服务联系人严情倩 0571-88177983, 15905817050, qizhenhz@zjuyh.com; 财务咨询(付款查询,票据服务等)联 系人程文秀 0571-88177983, 15990153584, qizhenhz@zjuyh. com。

(会议组委会 供稿)