



引文格式: 贾海梁, 杨春梅, 肖康勇, 等. 高温高压花岗岩水力压裂特征与破裂机制[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 179–191. DOI: 10.12401/j.nwg.2025058

Citation: JIA Hailiang, YANG Chunmei, XIAO Kangyong, et al. Hydraulic Fracturing Characteristics and Fracture Mechanism of Granite under High Temperature and Pressure[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 179–191. DOI: 10.12401/j.nwg.2025058

高温高压花岗岩水力压裂特征与破裂机制

贾海梁¹, 杨春梅¹, 肖康勇¹, 王明洋², 孙强²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 地热能作为一种分布广泛的可再生资源, 已成为人类未来能源安全的重要保障。干热岩型地热能因其储量巨大和清洁、高效、可再生的特点具有重大的开采价值。目前, 干热岩开采通常需要通过水力压裂来制造渗流换热通道, 因此, 储层水力压裂特征和破裂机制研究对于干热岩资源的高效开采具有重要意义。笔者以常见的干热岩储层——花岗岩为研究对象, 研究了不同围压、温度下水力压裂特征; 分析了压裂过程中声发射特征演化规律; 阐明了裂隙扩展规律及水力压裂影响因素; 揭示了水力压裂破裂机制和裂隙扩展准则。实验结果表明: ①常温和高温下花岗岩的水力压裂曲线均可以分为管孔充水、管孔增压、水力压裂、裂隙扩展 4 个阶段。②压裂后的裂隙均沿着管孔的深度方向扩展, 随着围压的增加, 裂隙长度增大, 裂隙路径更为复杂, 裂隙扩展类型包括沿晶断裂和穿晶断裂。③水力压裂特征受围压和温度的影响明显, 温度一定时, 围压越大, 破裂压力越大, 二者的关系近似呈线性; 围压一定时, 温度越高破裂压力越大, 但这种相关性并非线性。④花岗岩水力压裂主导破裂机制为张拉破裂, 但裂隙仍存在剪切破裂特征; 破裂压力受围压、温度和岩石材料性质的多重影响。研究结果可为花岗岩热储层的压裂设计提供支撑。

关键词: 干热岩; 水力压裂; 裂隙扩展; 破裂机制

中图分类号: P619.22; P314

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0179-13

Hydraulic Fracturing Characteristics and Fracture Mechanism of Granite under High Temperature and Pressure

JIA Hailiang¹, YANG Chunmei¹, XIAO Kangyong¹, WANG Mingyang², SUN Qiang²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Geothermal energy, as a widely distributed renewable resource, has become a crucial safeguard for humanity's future energy security. Enhanced geothermal systems (EGS), particularly those involving hot dry rock (HDR), hold significant exploitation value due to their vast reserves and characteristics of cleanliness, high

收稿日期: 2025-04-03; 修回日期: 2025-04-09; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 陕西省地质勘查基金项目“靶区干热岩层储层地应力分布及压裂特性分析”(61202110382)资助。

作者简介: 贾海梁(1987-), 男, 教授, 博士, 主要从事寒区岩石力学与工程相关研究工作。E-mail: hailiang.jia@xust.edu.cn。

efficiency, and renewability. Currently, the extraction of HDR typically requires hydraulic fracturing to create permeable flow channels for heat exchange. Therefore, research on the hydraulic fracturing characteristics and fracture mechanisms of reservoirs is of great importance for the efficient exploitation of HDR resources. This study focuses on granite, a common HDR reservoir, to investigate the hydraulic fracturing characteristics under varying confining pressures and temperatures. The evolution of acoustic emission (AE) characteristics during the fracturing process was analyzed, the fracture propagation patterns were elucidated, the influencing factors of hydraulic fracturing were clarified, and the fracture mechanisms and crack propagation criteria of hydraulic fracturing were revealed. The experimental results demonstrate that: (1) The hydraulic fracturing curves of granite under both room temperature and high temperature can be divided into four stages: borehole water filling, borehole pressure increase, hydraulic fracturing, and fracture propagation. (2) Post-fracturing cracks predominantly propagate along the borehole's depth direction. As the confining pressure increases, the crack length extends, and the fracture path becomes more complex. The fracture propagation modes include intergranular and transgranular fractures. (3) Hydraulic fracturing characteristics are significantly influenced by confining pressure and temperature. At a constant temperature, the breakdown pressure increases with higher confining pressure, exhibiting an approximately linear relationship. Under constant confining pressure, the breakdown pressure rises with increasing temperature, though this correlation is nonlinear. (4) The dominant fracture mechanism in granite hydraulic fracturing is tensile failure, though shear failure characteristics are also observed. The breakdown pressure is influenced by multiple factors, including confining pressure, temperature, and the material properties of the rock. The findings of this study can provide theoretical support for the fracturing design of granite-based geothermal reservoirs.

Keywords: hot dry rock (HDR); hydraulic fracturing; fracture propagation; fracture mechanism

随着社会的不断发展, 能源的消耗量越来越大, 能源的重要性越来越突出。与之相关的工程也越来越多, 如地热能开采工程、压缩空气储能工程等(胡剑等, 2014; 郭森等, 2015; 李馨馨等, 2019; 刘文辉等, 2023)。地热能作为一种分布广泛、环境友好型可再生资源, 已成为人类未来能源安全的重要保障(熊峰, 2020; 袁星芳等, 2023; 胥博文等, 2025)。地热能的储量在所有的可再生能源中名列前茅, 而地热能可分为浅层地热能和深部地热能, 其中干热岩型地热能属于深部地热能, 仅干热岩储量就占据了所有地热能的三分之一。因其丰富的储量和清洁高效、可再生的特点而拥有巨大的利用价值和良好的市场前景, 因此具有十分重要的研究意义(马兵, 2019; 刘生荣等, 2024)。

干热岩型地热能的开采通常需要通过水力压裂手段实现。1973 年, 美国 Fenton Hill 项目首次将水力压裂技术运用于 EGS 中(雷治红, 2020)。此后, 虽然有尝试化学刺激(Shao et al., 2018)、热刺激(Kumari et al., 2018)以及爆炸压裂等多种技术(郭亮亮, 2016), 但其效果并不理想, 仍需进一步采用水力压裂来增强热

储层的渗透性。目前, 世界上几乎所有的 EGS 工程都会采用水力压裂进行储层改造。水力压裂试验根据对地应力的模拟程度可分为假三轴和真三轴两类(李全贵等, 2022)。假三轴试验仪器通过液压对圆柱形试样施加四周相等的围压进行试验, 可研究大围压对试验的影响。真三轴仪器则三向应力更加独立, 可以更真实地模拟实际地层的受力情况, 然而其由于传动系统的限制, 难以施加较大的围压。

许多学者通过实验和分析方法研究了影响水力裂隙分布和几何形态的关键因素(应力状态、注入流速、流体粘度、岩石类型和各向异性结构)。大量实验结果表明, 水平应力的差异(Mao et al., 2017; 谢紫霄等, 2022)决定了裂隙的破裂压力、形状、数量和扩展(即单个裂隙或多个裂隙)。在已有裂隙存在的情况下, 水力裂隙扩展必然会发生改变, 而接近角度和裂隙前剪切强度是影响水力裂隙扩展的重要因素(Tan et al., 2017)。裂隙的形成与岩石性质有关, 相关学者对不同类型的岩石进行了实验, 发现不同岩石其破裂压力不同(Sebastian et al., 2013), 不同储层岩石中水力裂隙扩展模式也不同(He et al., 2017)。对于水力压裂

实验, 只有较为有限的研究采用了最合适的花岗岩, 大部分工作是用页岩、砂岩、石灰岩、砂浆及有机玻璃等其他类型岩石或材料完成的(Fan et al., 2014; Deng et al., 2016; Lin et al., 2017)。而大量的实验室测试利用声发射和CT图像分析研究了岩石的压裂行为, 发现不同岩石类型之间的破裂过程存在差异。因此, 这些主要基于其他类型岩石的研究是否适用于干热岩应用值得考虑。此外, EGS 中的岩石处于极高的地应力环境中, 之前的水力压裂研究大多是考虑较低围压工况对水力压裂试验的影响, 因此有必要开展在高围压条件下对花岗岩的水力压裂实验。

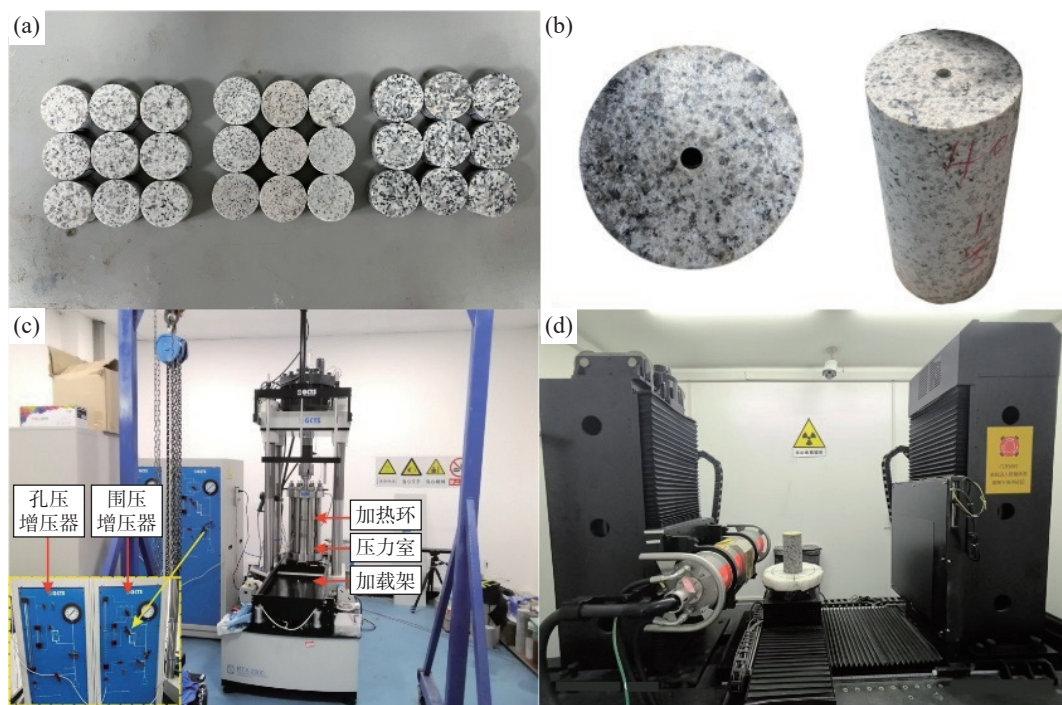
笔者以花岗岩试样为对象, 通过对试样开展不同温度、不同围压的水力压裂试验, 采用声发射研究水力压裂特征, 以肉眼观测和 CT 手段研究试样压裂过程中的裂隙扩展规律, 结合声发射、CT 扫描等试验厘

清岩石水力压裂的影响因素并揭示水力压裂机制。

1 试样制备与试验方案

1.1 试样加工

文中所用岩石采自陕西省渭南市华阴县和华州区的二长花岗岩, 野外编号分别为 YD30 和 YD39, 岩石表面无可见裂隙, 分别将相似新鲜、完整的大块岩石, 运往岩石加工的厂家, 加工成标准圆柱试样(高为 100 mm, 直径为 50 mm), 巴西劈裂试样(高为 25 mm, 直径为 50 mm)和水力压裂试样(高为 200 mm, 直径为 100 mm)并通过在试样其中一面中心位置垂直钻取直径为 10 mm(与仪器配件尺寸相匹配)、深度为 140 mm 的管孔(图 1), 模拟井眼。文中水力压裂试样主要采用 YD39 组, 部分采用 YD30 组。



a、b. 花岗岩试样; c. RTX2000 型高温高压三轴仪; d. 三英 multiscaleVoxel-1000CT 扫描仪

图1 试验样品及实验设备

Fig. 1 Test sample and experimental equipment

1.2 试验设备及试验方案

(1) 水力压裂实验: 为了研究实际环境不同深度处花岗岩水力裂隙的压裂特征和扩展规律, 通过美国 GCTS 公司生产的 RTX2000 型高温高压三轴仪对花岗岩试样开展水力压裂实验(图 1c)。该仪器用途广泛, 是一套综合岩石力学测试系统, 采用电液闭环数

字伺服控制。向管孔内注入压裂流体, 通过高压流体将试样压裂, 促使裂隙萌生和扩展, 同时结合声发射手段进行监测和观察。实验采用的仪器最高可提供 150 °C 的温度, 140 MPa 的围压, 因此可以满足本次水力压裂实验所需的条件。

文中试验采用清水作为压裂液, 该方式可以在

试样发生破裂的瞬间压力突然增加的现象来判断是否发生了破裂(He et al., 2017)。裂隙扩展等表观特征与试样温度 T 、围压 σ_c 的大小有关, 根据不同深度地应力情况并结合试验仪器实际可提供的温度来设定实验条件, 设计了 25 °C、120 °C 两种温度, 15 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa、50 MPa 等 5 种围压, 研究花岗岩水力压裂特征(裂隙破裂压力和裂隙扩展形态)与温度和围压的关系。

为了在高温下产生大的围压, 采用硅油用作该系统的围压介质(液压油)。通过施加 15 MPa 的偏应力来控制轴向应力 σ_a 。水力压裂现场作业中, 干热岩深度约为 2 000~4 000 m, 现场应力状态接近流体静力状态, 即偏应力不是很大。因此, 将偏应力设为 15 MPa 是较为合适的(Lin et al., 2017)。与围压相比, 这确保了更大的轴向应力, 从而导致沿管孔(垂直面)的方向压裂(Kumari et al., 2018)。另有文献表明, 岩石要可以被压裂, 其注入速率存在一个下限阈值(Zhuang et al., 2018), 当注入速率低于阈值时, 岩石不会被压裂。因此, 文中所有压裂实验的注入速率均选择 5 mL/min, 以保证岩石能够被压裂。

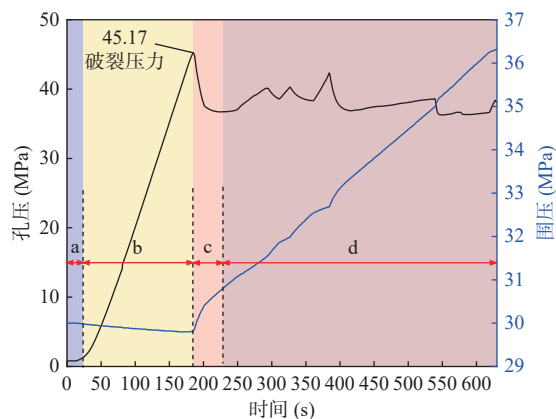
(2)CT 扫描实验: 为获取清晰的花岗岩试样内部图像, 更好地观测裂隙的空间形貌特征, 但扫描电镜会破坏试样的结构。因此, 笔者采用高精度 16 位工业 CT 扫描仪。仪器型号为三英 multiscaleVoxel-1000, 适用于大尺寸岩石扫描, 其特点是分辨率高、精度高且不会破坏试样本身的结构, 方便后续相关研究。CT 扫描系统如图 1d 所示, 试样扫描均采用由上至下的扫描顺序, 扫描电压为 385 kV, 电流为 1.3 μ A, 扫描图像的分辨率为 1 500×1 500×3 000。经过扫描后获得了 dr 格式的原始文件数据, 需要通过专业软件 Voxel Studio Recon 软件对水力裂隙和岩石基质进行三维预重构。由于试验用花岗岩内部呈现大量的矿物斑状结构, 为了后续可以较好地提取裂隙, 需多次调整选取合适的灰度值将裂隙与矿物斑状结构区分开。在三维预重构完成后, 得到 raw 格式文件。采用高级可视化软件 Avizo 对图像进行处理, 利用正交切片功能选取试样不同位置的切片。

2 试验结果

2.1 压裂曲线各阶段分析

本次压裂试验所记录的所有压裂曲线可以分为

4 个明显的阶段: 管孔充水、管孔增压、水力压裂、裂隙扩展(图 2)。在管孔充水阶段(a), 流体渐渐充满管道和管孔, 这个阶段的岩石管孔壁几乎不承受流体压力。当管孔完全被水充满后, 即进入管孔增压阶段(b), 此时流体开始进入岩石管孔壁附近预先存在的裂隙或孔隙中, 压力曲线小幅度增加。一旦管孔附近的微裂隙和孔隙被水充满, 孔压便开始增加且呈线性, 直线的斜率反映了流体压力的增加速度, 该斜率很大程度上取决于流体的注入速率。压力的累积(憋压)导致岩石发生破裂, 这与水力压裂阶段(c)相对应; 在压裂阶段, 岩石在高压裂压力下破裂, 孔压达到破裂压力。此时孔压大幅下降, 围压显著上升, 这是因为破裂导致储液空间突然变大, 所以孔压迅速下降。而与此同时压裂液还在注入, 其通过压裂的裂隙流进压力室, 岩石也发生了膨胀如径向位移, 且由于本实验的围压施加方式为了更接近实际工程中的围压变化, 在试样破裂后三轴压裂系统仍往压力室中注入围压介质, 从而导致围压迅速升高。随后进入裂隙延伸阶段(d), 此时压裂液已经进入裂隙中, 由于围压的作用, 裂隙趋于闭合, 压裂液在裂隙中不断憋压, 使得已有的裂隙不断扩展, 最终贯穿试样, 在试样内部和试样表面之间形成稳定的渗流通道。此时孔压较为稳定, 并缓缓上升, 直至试验结束。



a.管孔充水阶段; b.管孔增压阶段; c.水力压裂阶段;
d.裂隙扩展阶段

图2 压裂曲线阶段分析

Fig. 2 Stage analysis of fracturing curve

2.2 常温下花岗岩的压裂特征

笔者分别记录了在 YD30-1 和 YD39-1~YD39-4 号试样在水力压裂试验中孔压和围压随时间的变化情况, 即水力压裂曲线(图 3a~图 3e)。总体来说, 一开始孔压呈线性增加, 围压相应地下降。到达峰值压

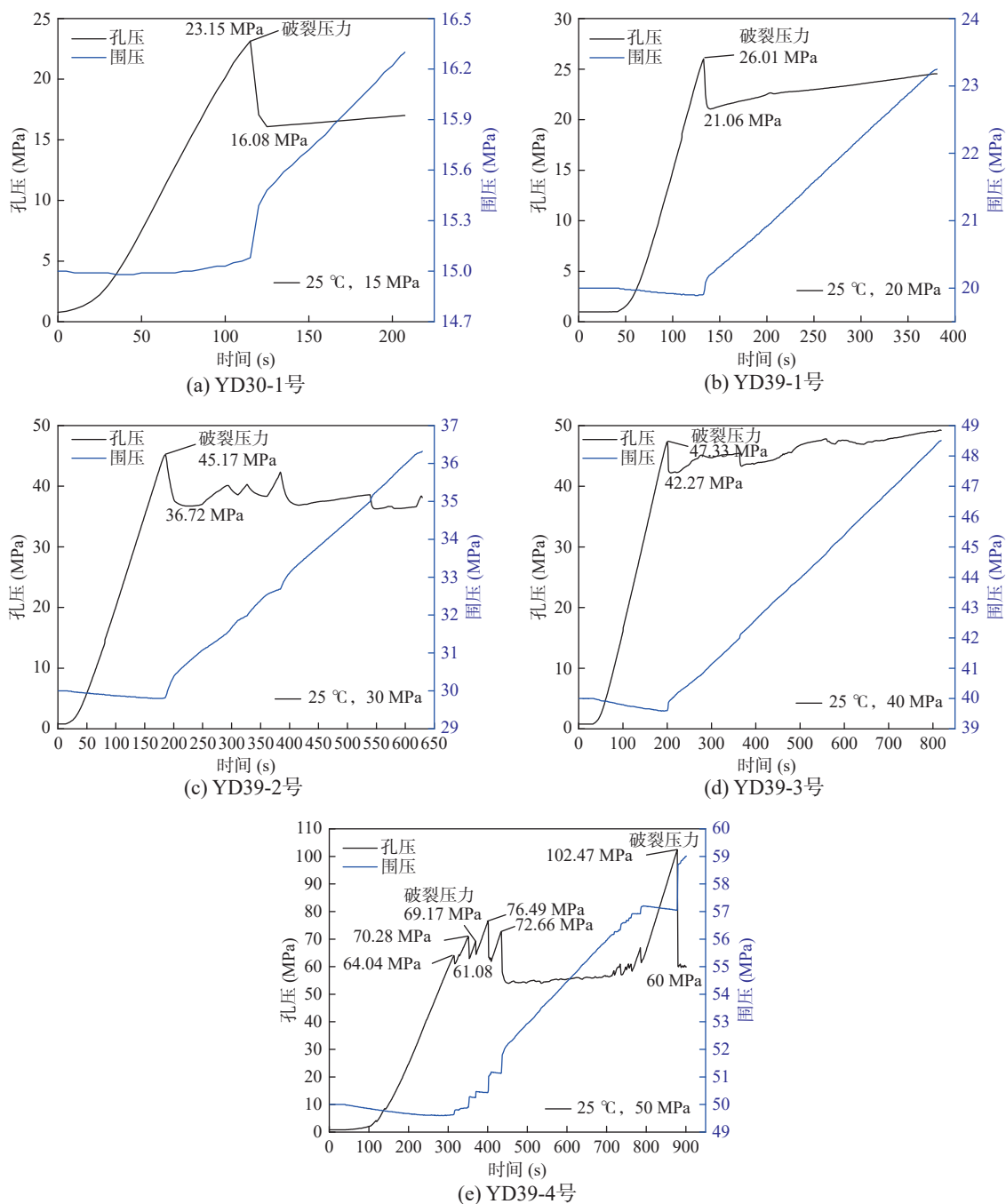


图3 常温下试样压裂曲线

Fig. 3 Sample fracturing curve at normal temperature

力时,可以观察到明显的孔压骤降和围压上升。此时的峰值压力即为试样的破裂压力。达到破裂压力后,孔压发生了多次明显的波动,直到孔压和围压的数值趋于接近时试验结束。而在 50 MPa 时,试样的孔压先稳定增加,第 314 s 孔压达到峰值 64.04 MPa,随后孔压发生骤降,降至 61.08 MPa,之后孔压和围压继续缓慢上升,在这过程中,孔压发生了多次明显的波动,并出现多个明显的峰值,分别为 70.28 MPa, 69.17 MPa,

76.49 MPa, 72.66 MPa, 102.47 MPa, 在最后一个峰值处孔压骤降了将近 42 MPa,最后直至孔压与围压趋于接近,整个试验时间为 901 s。在高达 50 MPa 或者更高的围压下,岩石会发生多次极为明显的压裂,该现象在以往文献中鲜有提及,有关围压的相关研究大多在较低围压水平下进行。该现象表明,高围压下岩石的水力压裂特征可能存在一个弹塑性转换的临界值,有待进一步验证。

2.3 高温下花岗岩的压裂特征

笔者记录了 YD39-5~YD39-9 号试样在水力压裂试验中孔压和围压随时间的变化情况(图 4a~图 4e)。总体来说,高温工况孔压和围压随时间的变化趋势与常温工况下大致相同。在 20 MPa 时,试样的孔压先稳定增加,第 203 s 孔压达到峰值 39.39 MPa,随后孔压发生骤降,降至 23.35 MPa,之后孔压发生波动,有一个峰值,峰值之后孔压下降再继续缓慢上升,直至

围压与孔压数值趋于接近,整个试验时间为 306 s。在 30 MPa 时,试样的孔压先稳定增加,第 208 s 孔压达到 30.82 MPa,但随后孔压并没有发生骤降,而是继续缓慢上升,直至 287 s 孔压有个小幅度的峰值,整个试验时间为 895 s。该工况下的压裂曲线比较异常,但是波动了多次,从围压的角度来看,在 30.82 MPa 这个孔压对应的围压开始增加,证明试样确实被压裂,孔压发生多次波动,围压也有一定的波动,这表明可能

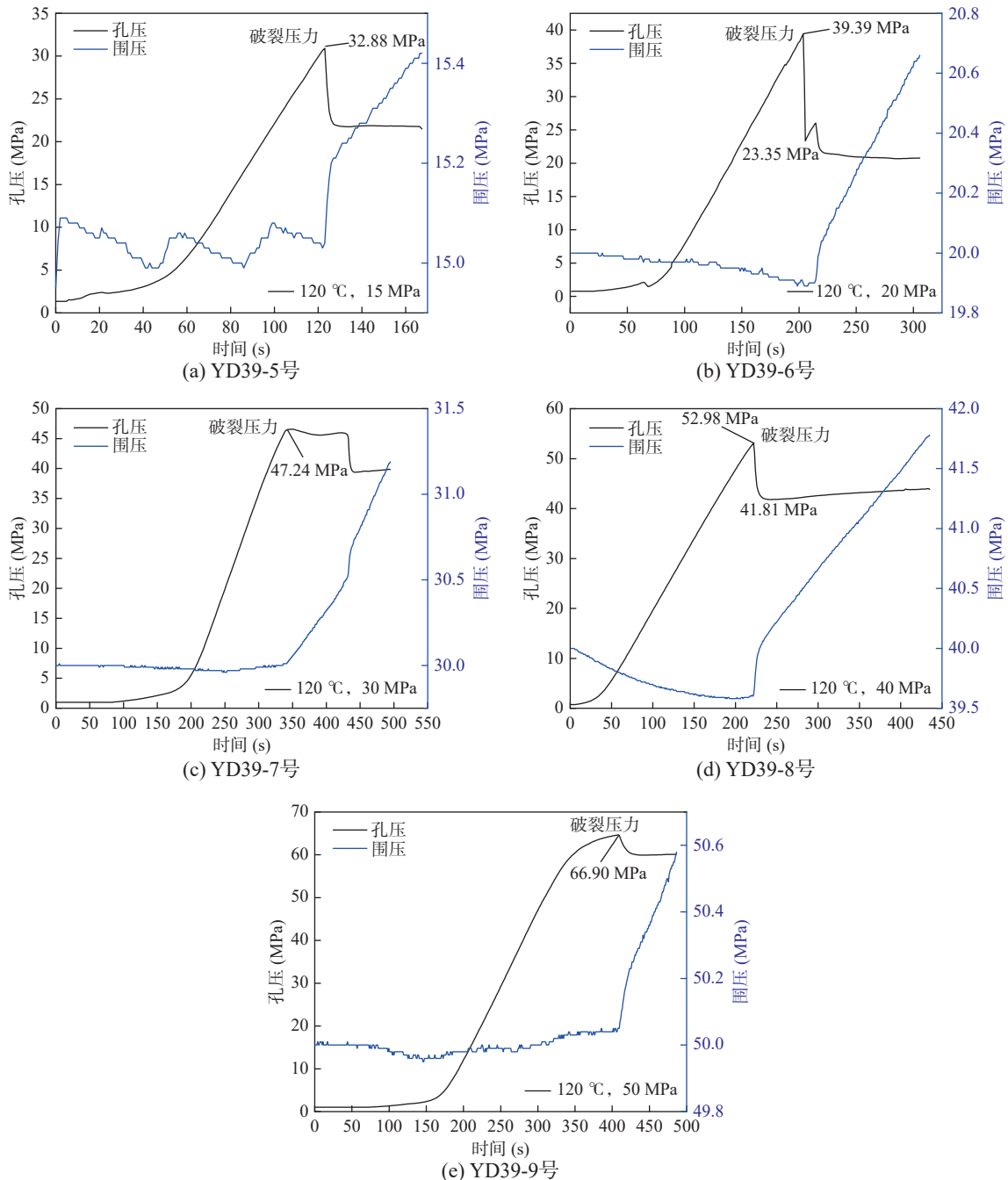


图4 高温下试样压裂曲线

Fig. 4 Sample fracturing curve at high temperature

存在多次压裂。在 40 MPa 时, 试样的孔压先稳定增加, 第 222 s 孔压达到峰值 52.98 MPa, 随后孔压发生骤降, 降至 41.81 MPa, 之后孔压继续缓慢上升, 也是在此时围压开始上升直至围压与孔压数值趋于接近, 整个试验时间为 435 s。

2.4 围压和温度对花岗岩起裂的影响

笔者记录了常温和高温工况下花岗岩试样的起裂压力随围压的变化情况(图 5)。围压和温度是水力

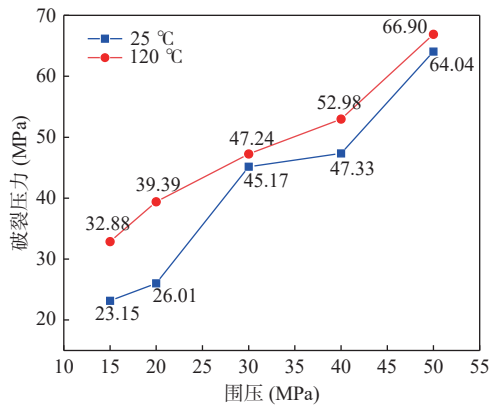


图5 不同温度花岗岩起裂压力随围压的变化曲线

Fig. 5 Curve of granite initiation pressure with confining pressure at different temperatures

压裂过程中的重要影响因素。高温和常温工况下花岗岩试样随围压的变化曲线趋势大致相同, 随着围压的增加, 试样的起裂压力逐渐增大(图 5)。在常温工况下, 随着围压的增加, 破裂压力分别为 23.15 MPa, 26.01 MPa, 45.17 MPa, 47.33 MPa, 64.04 MPa; 而在高温工况下, 随着围压的增加, 破裂压力分别为 32.88 MPa, 39.39 MPa, 47.24 MPa, 52.98 MPa, 66.90 MPa。结果表明, 在温度、轴压和注水速率一定时, 破裂压力随着围压的增加而不断增加, 且试样的破裂压力与围压的关系呈近似线性趋势; 而当围压一定时, 高温工况下试样的破裂压力要高于常温工况, 温度越高, 试样的破裂压力也越高, 但试样的破裂压力与围压的关系并非线性。

2.5 声发射特征演化规律

笔者记录了高温工况水力压裂试验中幅度、撞击数、振铃计数和能量的变化(图 6、图 7)。虽然声发射信号经过了多层介质(试样、热缩管、围压介质硅油、压力室壁面)的传递会不可避免地发生信号损失, 但从图中可以看出, 声发射参数与孔压变化具有较好的对应关系。

声发射信号的第一次大规模增加大致发生在孔

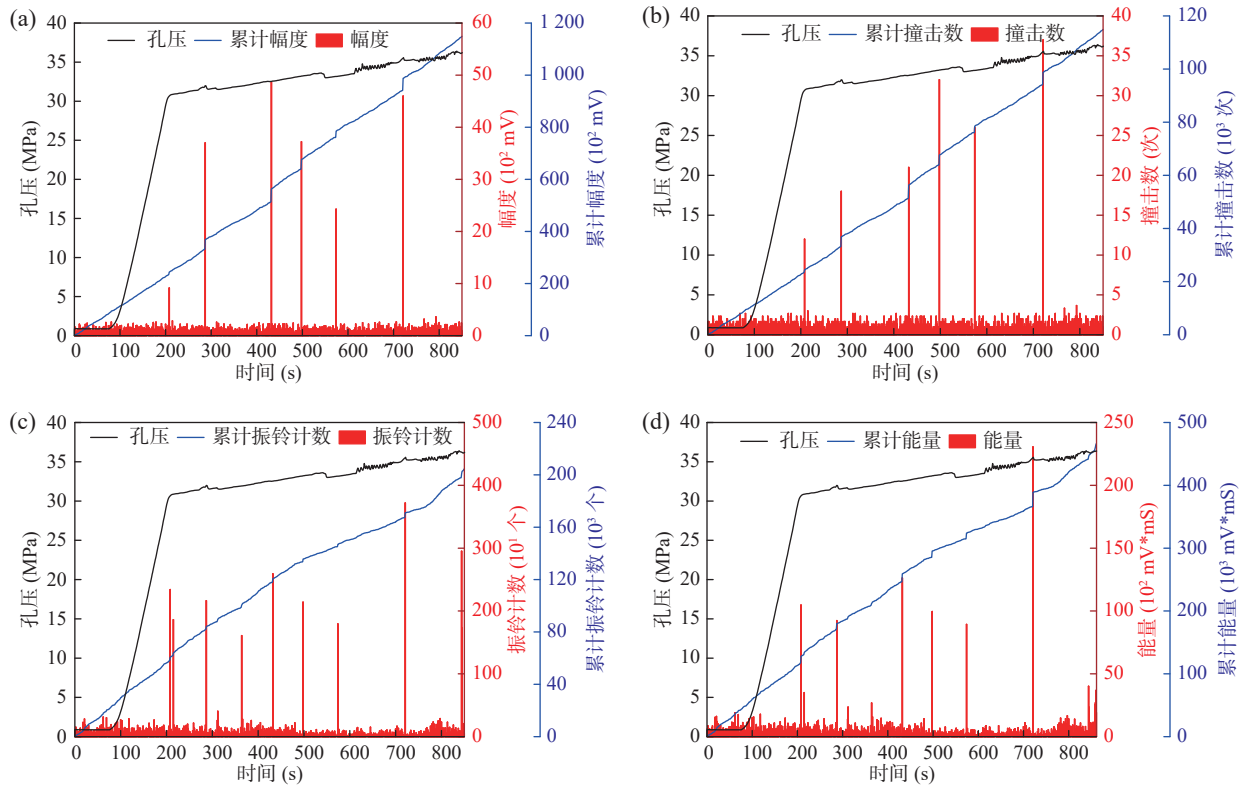


图6 YD39-7 号声发射特征(120 °C, 30 MPa)

Fig. 6 YD39-7 acoustic emission characteristics (120 °C, 30 MPa)

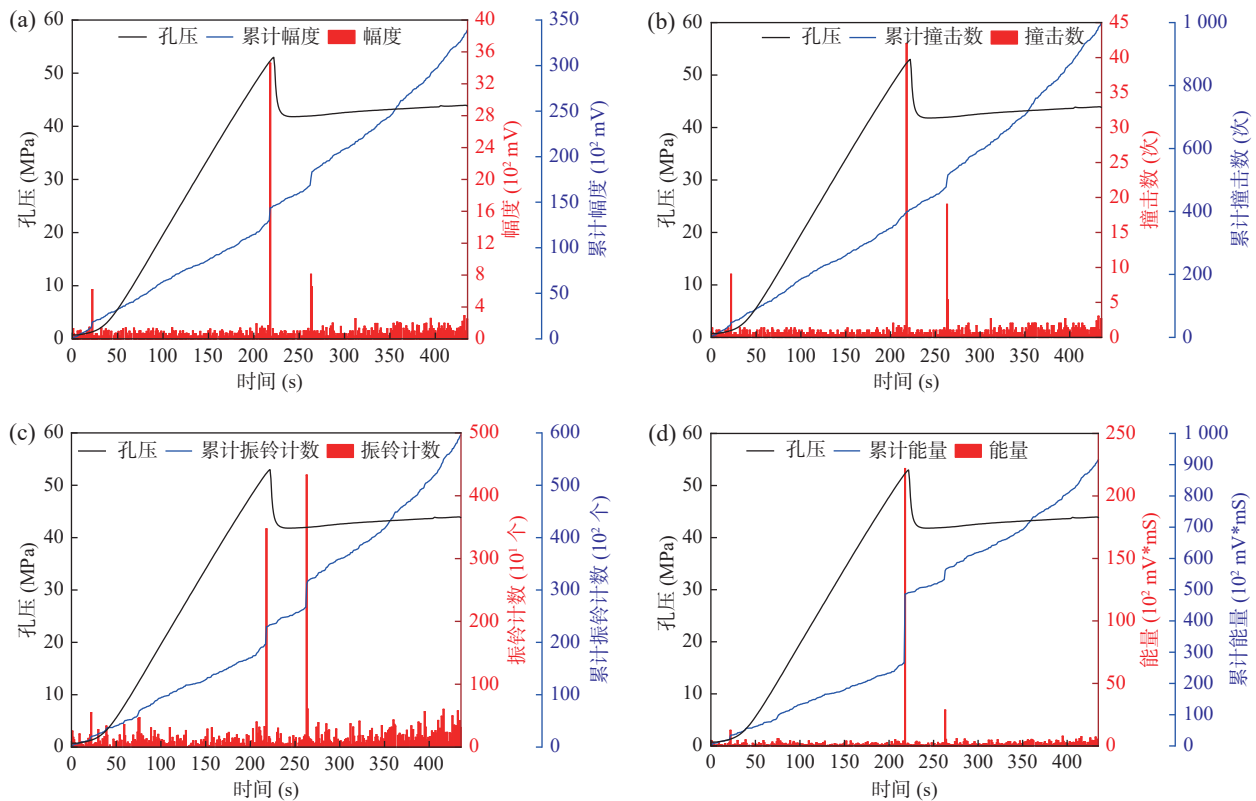


图7 YD39-8号声发射特征(120 °C, 40 MPa)

Fig. 7 YD39-8 acoustic emission characteristics (120 °C, 40 MPa)

压到达破裂压力时。可以从累计曲线上也看出,声发射的信号发生了剧增,累计曲线图呈阶梯状。此时,声发射信号剧增,意味着主裂隙的萌生。在孔压到达破裂压力之后,声发射信号强度迅速降低。值得注意的是,在30 MPa工况下孔压发生多次波动的时候,声发射参数也相应地发生了多次突增。这意味着多处裂隙的萌生与扩展。随着孔压的不断增加,声发射各参数也逐渐到达其最高值。另外还可以看出,随着时间的变化,声发射信号在某些时间点发生剧增,而孔压却没有大的波动,这在一定程度上反映了孔压变化的滞后性。即压裂的过程中,岩石中发生了微破裂,由于这一过程十分迅速,在围压的作用下这些微裂隙已经闭合,孔压还没来得及变化该破裂过程便已完成,而声发射信号则可以灵敏且迅速地将这一现象反映出来,这也说明了通过声发射手段来监测裂隙的萌生与扩展相比孔压更为灵敏,它不仅可以监测宏观的破裂现象,也可以监测更为细微的破裂现象。

除幅度外,随着围压的增加,试样的撞击数、振铃计数和能量均有所增加。30 MPa时的幅度峰值为4 599.31 mV,40 MPa时的幅度峰值为3 457.52 mV。30 MPa时的撞击数峰值为37次,40 MPa时的撞击数

峰值为42次。30 MPa时的振铃计数峰值为3 719个,40 MPa时的振铃计数峰值为4 326个。30 MPa时的能量峰值为 $221 \times 10^3 \text{ mV} \cdot \text{mS}$,40 MPa时的能量峰值为 $230 \times 10^3 \text{ mV} \cdot \text{mS}$ 。

2.6 裂隙空间形貌特征

为了获取清晰的花岗岩试样内部图像,更好地观测裂隙的空间形貌特征,文中采用高精度16位工业CT扫描仪对YD39-4号试样进行扫描。试验结果如下,可以看出裂隙扩展到了试样的底部。总体来说,裂隙空间形貌特征为双翼平面裂隙(Stephen et al., 2018),裂隙面几乎在一个平面上。为了观察裂隙的扩展方向和扩展路径,笔者选取了试样在不同高度处的水平方向切片(图8),a是距离试样上表面5 mm处,此时还未见裂隙;b是55 mm处,往下即将看到裂隙;c是60 mm处,此处主裂隙出现;d是110 mm处,裂隙有凸起;e是120 mm处,此处裂隙平滑,说明裂隙路径发生了转向;f是140 mm管孔底部,此处裂隙发生错动;g是试样没有钻孔处的裂隙,出现次级裂隙;h是试样最底部的裂隙,裂隙路径发生明显转向。随着切片高度的变化,可以看出随着高度的增大,裂隙也越来越清晰,猜测裂隙开度越来越大,

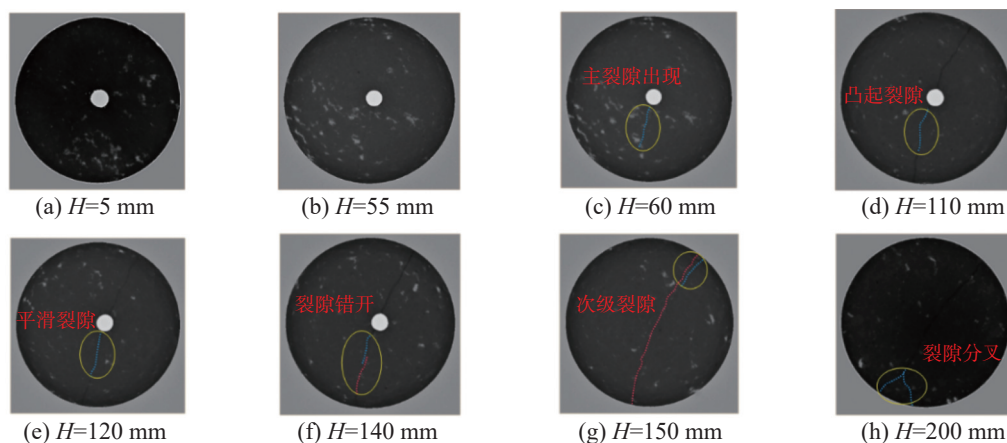


图8 XY 方向 2D 切片

Fig. 8 2D slice in XY direction

裂隙的路径也一直在变化。笔者选取了试样在不同位置的竖直方向切片(图9),发现该裂隙偏离管孔一定的距离,且并非起裂于试样的顶部,而是起裂于距离试样顶部的某个位置。另外发现该裂隙较为粗糙且相当曲折,有一定数量的次级裂隙,但总体数量较少,部分地方由于颗粒破碎,导致局部裂隙的开度较大,但裂隙的整体开度较小。

3 讨论

3.1 破裂机制分析

在图10中,选取了一些典型的CT切片,裂隙的周围存在一些灰度较浅的硬颗粒,并用橙色虚线表示出来。裂隙路径表明,裂隙主要沿着灰度较深的地方

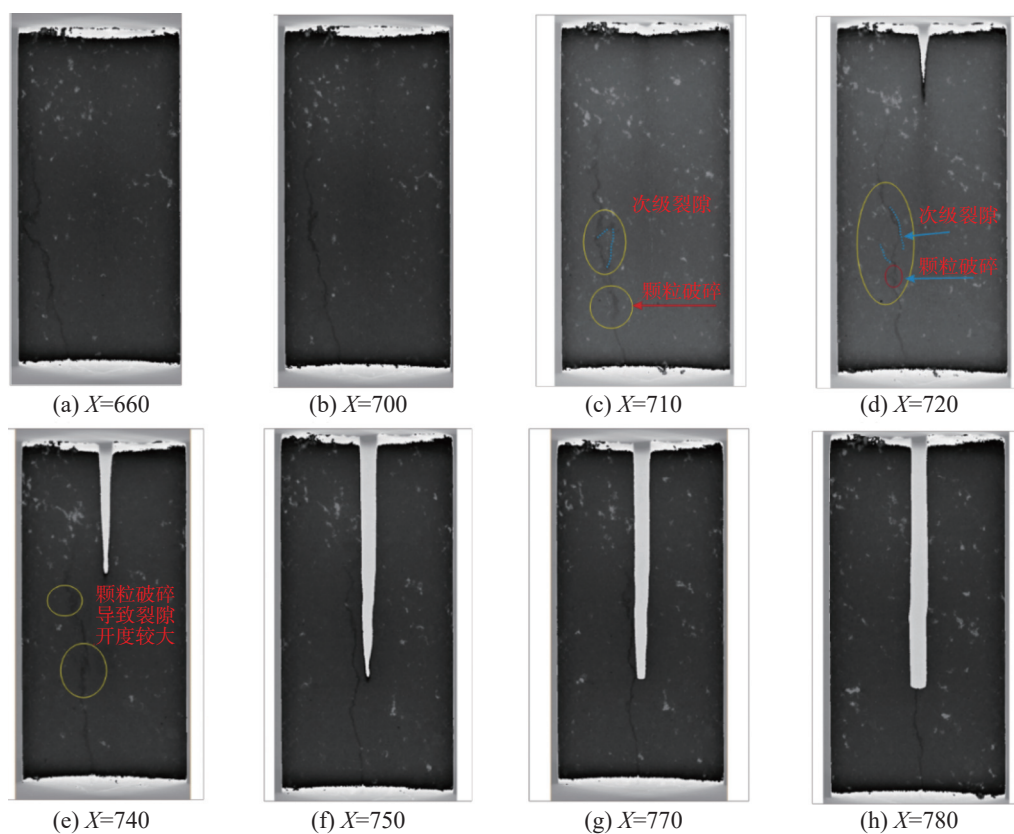


图9 YZ 方向 2D 切片

Fig. 9 2D slice in YZ direction

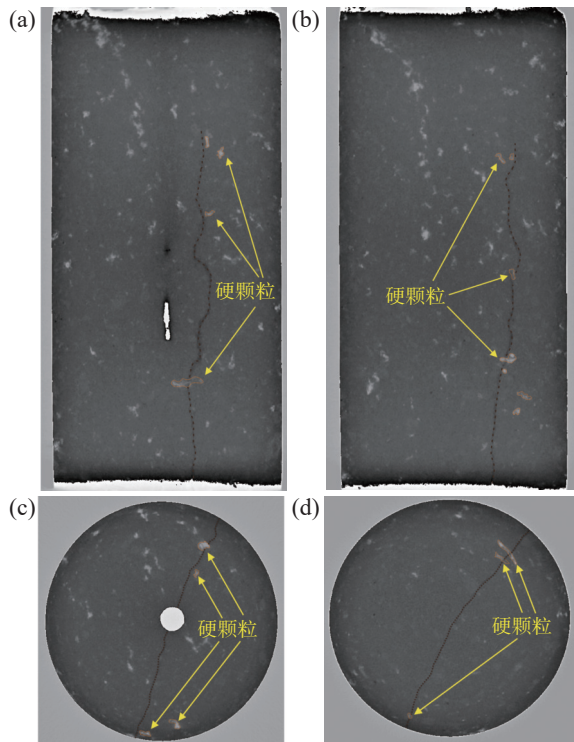


图10 典型 CT 切片

Fig. 10 Typical CT section

扩展,当裂隙的扩展遇到硬颗粒时,它们会部分沿着颗粒边界扩展,即沿晶断裂,也有多处的裂隙穿过了颗粒而扩展,即穿晶断裂。研究表明,穿过矿物颗粒的穿晶断裂被认为是张拉破裂造成的(Chen et al., 2015),而沿晶断裂则可能是张拉破裂或剪切破裂造成的。由于文中裂隙既存在沿晶断裂,也存在穿晶断裂,仅根据此还不能确定其究竟是张拉造成的还是剪切造成的。因此,接下来采用声发射手段,验证分析岩石水力压裂过程中的破裂机制。

YD39-7 号试样水力压裂 4 个阶段的声发射 RA-AF 值分布图(图 11)显示,试样的 RA 值分布范围在 0~20 ms/V,大多集中在 0~3 ms/V, AF 值分布范围在 0~180 kHz,大多集中在 0~40 kHz。整体 RA-AF 值分布较为集中,并有少量点分布较为零散。(a)管孔充水阶段,声发射事件共 20 个,信号在对角线两侧均有分布。(b)管孔增压阶段,声发射事件共 197 个,信号在两侧均有分布。其中剪切型的声发射事件数有 102 个,本阶段占比为 51.8%,张拉型的声发射事件数有 95 个,本阶段占比为 48.2%。(c)压裂阶段,声发射事件共 24 个,信号多集中在纵轴,符合张拉破裂的

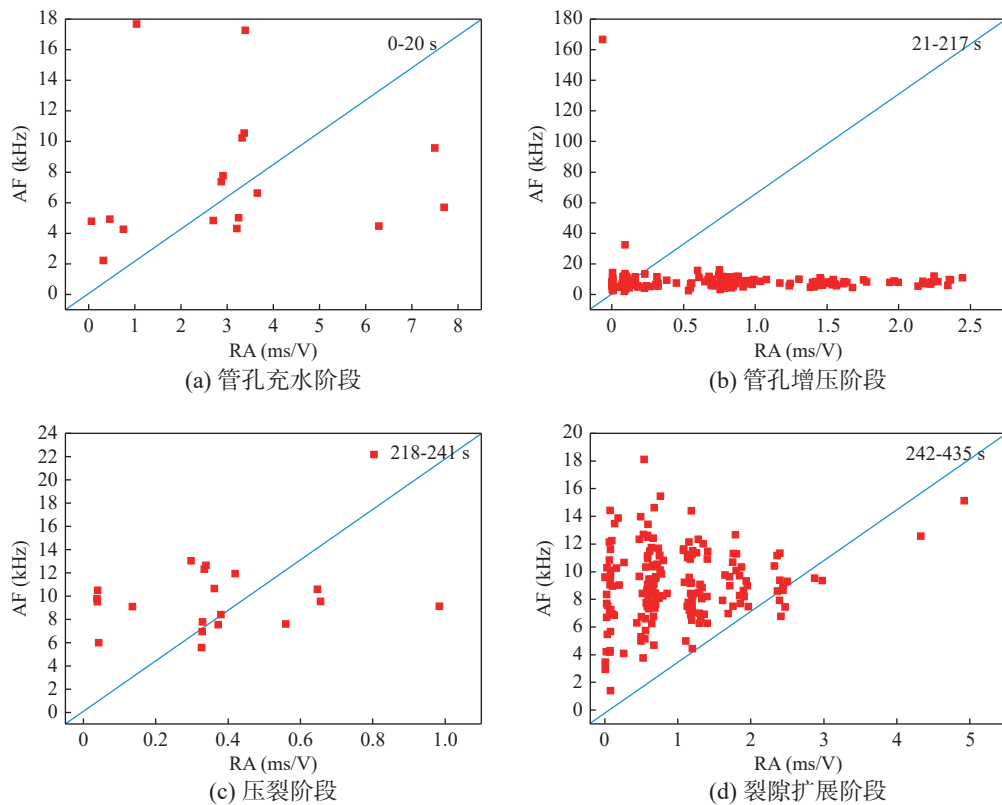


图11 声发射 RA-AF 值分布

Fig. 11 Acoustic emission RA-AF value distribution

模式。其中剪切型的声发射事件数有 8 个, 本阶段占比为 33.3%, 张拉型的声发射事件数有 16 个, 本阶段占比为 66.7%。(d) 裂隙扩展阶段, 声发射事件共 194 个, 信号多集中在纵轴, 符合张拉破裂的模式。其中剪切型的声发射事件数有 9 个, 本阶段占比为 4.7%, 张拉型的声发射事件数有 185 个, 本阶段占比为 95.3%。

因此, 在试样管孔充水和管孔增压阶段, 其破裂机制为剪切破裂和张拉破裂机制混合作用; 在试样压裂阶段, 超过 2/3 呈现张拉破裂特征, 其破裂机制主要为张拉破裂, 产生的裂隙也存在剪切破裂, 此时高能量释放, 主要发生在裂隙萌生的瞬间, 压裂过程中剪切破坏产生的裂隙通常是不规则的。这与文献中提到的一致, 即使是以张拉破裂为主导的破坏形式, 在临近破坏阶段, 也会出现较多呈现剪切破裂特征 (即 AF 值较小、RA 值较大) 的声发射信号 (甘一雄等, 2020)。在裂隙扩展阶段, 其破裂机制主要为张拉破裂。综上所述, 花岗岩在水力压裂过程中主导破裂机制为张拉破裂, 但仍存在剪切破裂特征。

3.2 起裂压力预测

裂隙破裂压力是指发生破裂时管孔壁处压力的大小, 假设岩石是线弹性体, 前文试验结果表明, 本文所用花岗岩的主导破裂机制为张拉破裂, 张拉破裂准则对线弹性岩石比较适用, 当管孔壁处岩石的拉伸应力达到并大于其抗拉强度时, 即 $\sigma_{\max}(\theta_0) \geq \sigma_t$, 岩石将发生断裂。

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \sigma_r \\ \sigma_H &= \frac{1}{2}[(\sigma_\theta + \sigma_z) + \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau^2}] \\ \sigma_h &= \frac{1}{2}[(\sigma_\theta + \sigma_z) - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau^2}]\end{aligned}\quad (1)$$

根据张拉破裂准则, 上述的 3 个应力中只要任意一个主应力超过岩石抗拉强度时, 裂隙就会在管孔壁处起裂。根据断裂力学理论, 初始断裂应处于 $z-\theta$ 平面内 (图 12)。

因此, σ_H 、 σ_h 对裂隙起裂起着主导作用, 通过比较可得 σ_H 、 σ_h 中较大的应为 σ_H , 所以最大拉应力的表达式为:

$$\sigma_{\max}(\theta) = \sigma_H = \frac{1}{2}[(\sigma_\theta + \sigma_z) + \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau^2}] \quad (2)$$

为了求出最大拉应力, 对上式进行求导:

$$\frac{d\sigma_{\max}(\theta)}{d\theta} = 0 \quad (3)$$

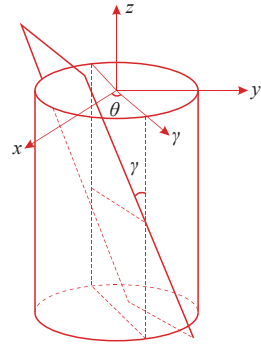


图12 裂隙起裂平面

Fig. 12 Fracture initiation plane

在 $\theta = \theta_0$ 时, 拉应力最大, 即:

$$\sigma_{\max}(\theta) = \sigma_t \quad (4)$$

由于 $\sigma_H = \sigma_h = \sigma_c$, 综上所述, 破裂压力 P_b 表达式为:

$$P_b = 2\sigma_c + \sigma_t + \frac{\partial T E \Delta T}{1 - 2\nu} \quad (5)$$

在公式(5)中, 破裂压力是围压、岩石材料性质和温度的函数。然而, 应强调的是, 岩石的材料特性 (包括抗拉强度、杨氏模量、泊松比和热膨胀系数) 以及流体特性 (包括压缩性和粘度) 随高温而改变。此外, 向高温岩石中注入冷水可导致热诱导的沿晶和穿晶断裂, 热损伤可以提高岩石基质的孔隙度和渗透率。因此, 在估算岩石在应力和温度条件下的破裂压力时, 也需要考虑这些复杂性。

将试验得到的数值与公式(5)计算得到预测值进行对比 (图 13), 可以发现破裂压力的试验值大大低于预测值。学者 Li、W.G.P. Kumari 等在他们的试验中也遇到了这样的情况, 其试验结果得到的拟合直线斜率也均小于 2。可能是由于水的软化效应, 即水分子

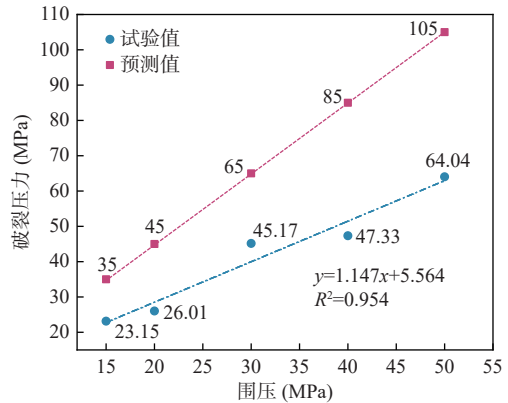


图13 破裂压力试验值与预测值

Fig. 13 Experimental and predicted values of rupture pressure

会削弱矿物之间的粘结,进而降低抗拉强度,从而降低破裂压力。实验表明,破裂压力受岩石的各向异性影响,并取决于其矿物组成等其他微观因素,前文核磁共振测试结果表明试样具有较强的各向异性。此外,也取决于压裂方法,流体压力作用于整个管孔表面,由于较大的表面积而导致其具有较高的张力。但根据试验结果和公式预测结果可以肯定的是,破裂压力和围压之间的线性关系保持不变。

由前文可知,在围压 20 MPa 时,裂隙长度仅扩展至 83 cm,只占试样高度的 41.5%,随着围压的增加,发现试样的裂隙越来越长,表明该现象与围压和破裂压力有关,对此可以用式(5)来解释。在整个水力压裂过程中,管孔的表面积保持不变,因此作用在管孔表面上的破裂压力会随围压的增加而增加。这意味着需要更大的力和更高的能量才可以透过管孔造成裂隙贯穿试样。如前所述,破裂压力与围压呈正相关。在围压较低时,试样的破裂压力较低,因此,在最终破裂后,试样上的应力总和很快变为零,从而阻止了试样裂隙的进一步扩展。围压越高时,试样破裂压力越高,所需能量越高,破裂时间相比低围压工况也更久,使得裂隙可以进一步地扩展。即随着围压的增大,试样的裂隙会扩展地越来越长。

4 结论

(1)水力压裂曲线分为管孔充水、管孔增压、水力压裂、裂隙扩展 4 个阶段。在压裂阶段可以同时观察到明显的孔压下降和围压上升。声发射信号的第一次大规模增加大致发生在孔压达到破裂压力时。

(2)压裂后的裂隙均沿着试样的管孔方向竖向扩展,随着围压的增加,裂隙长度增大,裂隙路径更为复杂。压裂裂隙并非从试样的顶部起裂,起裂于距离试样顶部的某个位置。裂隙较为粗糙且相当曲折,主裂隙周围有一定数量的次级裂隙,部分地方由于颗粒破碎,导致局部裂隙开度较大。裂隙既存在沿晶断裂,也存在穿晶断裂。

(3)水力压裂特征受围压和温度影响明显,结果表明:温度一定时,围压越大,破裂压力越大,二者的关系近似呈线性,且围压越大,破裂时间越长。在热冲击现象不显著的情况下,围压一定时,温度越高,破裂压力越大。

(4)花岗岩水力压裂主导破裂机制为张拉破裂,

但裂隙仍存在剪切破裂特征;破裂压力受围压、温度和岩石材料性质的多重影响。

参考文献(References):

- 甘一雄,吴顺川,任义,等.基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J].岩土力学,2020(7):41.
- GAN Yixiong, WE Shunchuan, REN Yi, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020(7): 41.
- 郭亮亮.增强型地热系统水力压裂和储层损伤演化的试验及模型研究[D].长春:吉林大学,2016.
- GUO Liangliang. Test and model research of hydraulic fracturing and reservoir damage evolution in Enhanced Geothermal System [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- 郭森,马致远,李劲彬,等.我国地热供暖的现状 & 展望[J].西北地质,2015,48(4):204-209.
- GUO Sen, MA Zhiyuan, LI Jinbin, et al. Status and Prospects of Geothermal Heating in China[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(4): 204-209.
- 胡剑,苏正,吴能友,等.增强型地热系统热流耦合水岩温度场分析[J].地球物理学进展,2014,29(3):1391-1398.
- HU Jian, SU Zheng, WU Nengyou, et al. Analysis on temperature fields of thermal-hydraulic coupled fluid and rock in Enhanced Geothermal System[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1391-1398.
- 李全贵,邓羿泽,胡千庭,等.煤岩水力压裂物理试验研究综述及展望[J].煤炭科学技术,2022,50(12):62-72.
- LI Quanguai, DENG Yize, HU Qianting, et al. Review and prospect of coal rock hydraulic fracturing physical experimental research [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 62-72.
- 李馨馨,李典庆,徐轶.地热对井系统裂隙岩体三维渗流传热耦合的等效模拟方法[J].工程力学,2019,36(7):10.
- LI Xinxin, LI Dianqing, XU Yi. Equivalent simulation method of three-dimensional seepage and heat transfer coupling in fractured rock mass of geothermal-borehole system[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(7): 10.
- 刘文辉,董英,张新社,等.西北省会城市地热中深层地埋管供热系统发展潜力及环境效益分析[J].西北地质,2023,56(3):186-195.
- LIU Wenhui, DONG Ying, ZHANG Xinshe, et al. Development Potential and Environmental Benefit Analysis of Geothermal Medium-Deep Buried Pipe Heating System in Capital Cities in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 186-195.
- 雷治红.青海共和盆地干热岩储层特征及压裂试验模型研究

- [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- LEI Zhihong. Study on the characteristics of hot dry rock reservoir and fracturing test model in the Gonghe Basin, Qinghai Province [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- 刘生荣, 罗新刚, 辜平阳, 等. 共和盆地深部构造格架及其对干热岩热源的影响[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 130–141.
- LIU Shengrong, LUO Xingang, GU Pingyang, et al. Deep Tectonic Framework of Gonghe Basin and Its Influence on Heat Source of Dry Hot Rock[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 130–141.
- 马兵. 热固耦合下储层岩石的地质力学特性及损伤演化规律研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- MA Bing. Study on Geomechanical Behavior and Damage Evolution of Reservoir Rock under Thermo-mechanical Coupling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- 谢紫霄, 黄中伟, 熊建华, 等. 天然裂缝对干热岩水力压裂裂缝扩展的影响规律[J]. *天然气工业*, 2022, 42(4): 63–72.
- XIE Zixiao, HUANG Zhongwei, XIONG, Jianhua et al. Influence of natural fractures on the propagation of hydraulic fractures in hot dry rock[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(4): 63–72.
- 熊峰. 裂隙岩体非线性渗流特性及水热耦合模拟研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- XIONG Feng. Study on nonlinear flow behaviors and coupled hydro-thermal simulation of fractured rock masses[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- 胥博文, 朱怀亮, 杨忠彦, 等. MT法和二维地震勘探在太康隆起西部地区地热资源调查评价中的应用[J]. *西北地质*, 2025, 58(3): 131–142.
- XU Bowen, ZHU Huailiang, YANG Zhongyan, et al. The Application of MT Method and 2D Seismic Exploration to Detect Geothermal Resources in Western Region of Taikang Uplift[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(3): 131–142.
- 袁星芳, 邢立亭, 贾群龙, 等. 威海市七里汤地热田特征及其成因机制[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 209–218.
- YUAN Xingfang, XING Liting, JIA Qunlong, et al. Characteristics and Genetic Mechanism of Qilitang Geothermal Field in Weihai[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 209–218.
- Chen Y, Nagaya Y, Ishida T. Observations of Fractures Induced by Hydraulic Fracturing in Anisotropic Granite[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1455–1461.
- Deng J Q, Lin C, Yang Q, et al. Investigation of directional hydraulic fracturing based on true tri-axial experiment and finite element modeling[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 75: 28–47.
- Fan T G, Zhang G Q. Laboratory investigation of hydraulic fracture networks in formations with continuous orthogonal fractures[J]. *Energy*, 2014, 74: 164–173.
- He J, Lin C, Li X, et al. Initiation, propagation, closure and morphology of hydraulic fractures in sandstone cores[J]. *Fuel*, 2017, 208: 65–70.
- Kumari W G P, Ranjith P G, Perera M S A, et al. Hydraulic fracturing under high temperature and pressure conditions with micro CT applications: Geothermal energy from hot dry rocks[J]. *Fuel*, 2018, 230: 138–154.
- 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.
- Lin C, He J, Li X, et al. An Experimental Investigation into the Effects of the Anisotropy of Shale on Hydraulic Fracture Propagation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(3): 543–554.
- Mao R B, Feng Z J, Liu Z H, et al. Laboratory hydraulic fracturing test on large-scale pre-cracked granite specimens[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017: 278–286.
- Sebastian B, Michael M, Ferdinand S C, et al. Hydraulic and Sleeve Fracturing Laboratory Experiments on 6 Rock Types[A]. Andrew P B, John M, Rob J (eds). *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*[M]. 2013, Ch 20.
- Shao H, Kabilan S, Childers M I, et al. Environmentally friendly, rheoreversible, hydraulic fracturing fluids for enhanced geothermal systems[J]. *Geothermics*, 2018, 58: 72.
- Stephen, Rassenfoss. Digging Up New Information On What Fractures Really Look Like[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2018, 70(3): 38–39.
- Tan P, Jin Y, Han K, et al. Analysis of hydraulic fracture initiation and vertical propagation behavior in laminated shale formation [J]. *Fuel*, 2017, 206: 482–493.
- Zhuang L, Kim K Y, Jung S G, et al. Effect of Water Infiltration, Injection Rate and Anisotropy on Hydraulic Fracturing Behavior of Granite[J]. 2018(3): 1–15.