

受地应力调控脉冲注液下钻孔内围岩破裂特征研究

吕 岩, 孙平贺, 朱峻生, 肖 烽, 曹 函*, 张绍和

(中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 破裂特征研究在非常规能源开采中具有重要意义。利用自研的真三轴水力压裂模拟试验系统, 选取湘东北燕山期的花岗岩, 在测定基本物理力学参数基础上开展不同地应力条件下的花岗岩水力压裂监测试验, 基于水压特征值提取结合三维形貌扫描方法描述花岗岩裂缝演化特征及破裂面破裂效果, 分析脉冲注液条件下地应力对水压响应特征参数影响, 随着地应力的增加, 破裂压力和压降均呈增加趋势。高地应力条件抑制了裂缝的扩展使得主裂缝发生偏转, 低地应力条件有利于形成高粗糙度的破裂面, 且在该条件下的裂缝面分形值也更高。这对复杂地质条件下钻孔围岩破裂特征研究具有一定意义。

关键词: 地应力; 形貌扫描; 脉冲注液; 水力压裂; 破裂特征; 储层压裂

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0064-06

Study on the fracture characteristics of the surrounding rock in boreholes under pulse fluid injection regulated by ground stresses

LÜ Yan, SUN Pinghe, ZHU Junsheng, XIAO Feng, CAO Han*, ZHANG Shaohe

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: The study of fracture characteristics is of great significance in unconventional energy exploitation. Using the self-developed true triaxial hydraulic fracture simulation system, granite from Yanshan period in northeast Hunan Province was selected to carry out hydraulic fracture monitoring tests under different geopathological stresses based on the determination of basic physico-mechanical parameters. Based on the extraction of hydraulic eigenvalues combined with the method of three-dimensional morphological scanning to describe the characteristics of granite fracture evolution and rupture effect of rupture surfaces, the impacts of the geopathological stress on the characteristic parameters of hydraulic pressure response were analysed under the conditions of pulse fluid injection. The rupture pressure and pressure drop increased with the increase of geostress. The high geostress condition inhibits the fracture extension and makes the main fracture deflected, while the low geostress condition is conducive to the formation of the fracture surface with high roughness, and the fracture surface fractal value is higher under this condition. This is of some significance to the study of fracture characteristics of borehole perimeter rock under complex geological conditions.

Key words: geostress; 3D morphology scanning; pulse injection; hydraulic fracturing; fracture characteristics; reservoir fracturing

0 引言

脉冲注液是非常规能源开发中最常用的一种

方法, 将流体脉动注入目标储层, 产生的高压使岩石破坏, 产生水力裂缝与天然裂缝沟通, 丰富天然

收稿日期: 2025-05-31; 修回日期: 2025-07-16 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.010

基金项目: 国家科技重大专项“绿色高效精准智能化钻探技术集成”(编号: 2024ZD1003105)

第一作者: 吕岩, 男, 汉, 2002年生, 博士研究生, 地质工程专业, 从事岩石力学、非常规能源开采、钻具研发等方面工作, 湖南省长沙市麓山南路932号, 245007003@csu.edu.cn。

通信作者: 曹函, 女, 汉族, 1982年生, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事非常规能源钻采关键技术与储层保护等方面教学与科研工作, 湖南省长沙市麓山南路932号, hancuo@csu.edu.cn。

引用格式: 吕岩, 孙平贺, 朱峻生, 等. 受地应力调控脉冲注液下钻孔内围岩破裂特征研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 64-69.

LÜ Yan, SUN Pinghe, ZHU Junsheng, et al. Study on the fracture characteristics of the surrounding rock in boreholes under pulse fluid injection regulated by ground stresses[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 64-69.

裂隙网络,增加储层的整体连体性和渗透性^[1]。但常规压裂方式一般多采用定常流的流体注入方式,虽然在一定程度上贯通了裂缝网络,但存在注入压力较高等问题^[2]。因此在注液方式上已经提出了多种流体注入方式,如循环压裂和脉冲压裂等。这些方法在理论上能够通过调节注入流体的压力和流量,控制裂缝的生长和方向。然而,对于这些注入方式对应力响应的具体影响,尚缺乏深入的理解和充分的实验验证。

地应力是影响水力裂缝扩展的主要因素。Damani等^[3]在花岗岩水力压裂试验中探究了地应力对裂缝扩展的影响;Zou等^[4]研究表明在典型页岩中低水平应力差有助于形成复杂的裂缝网络,高水平应力差下可能会产生简单的横向裂缝;进一步的,Hou等^[5]总结了高水平应力差下的4种横向裂缝模式:横向裂缝、带层理面的横向裂缝、带层理面的天然裂缝以及包含层理面和天然裂缝的横向裂缝。

目前为止,国内外学者集中于水力裂缝扩展进行了大量的试验研究,但不少试验样品仍以圆柱样为主,并以单轴或伪三轴加载方式进行试验,然而实际储层环境下,岩石所承受的应力是复杂的三维应力场,这种方法无法精确模拟地下储层岩石的真实的应力状态,储层条件下的裂缝扩展过程难以研究^[6-10]。此外,压裂后对裂缝面以定性分析为主,而对裂缝面的微观特性和几何属性的定量分析还不够深入,裂缝面的粗糙度、形态和分布特性对于裂缝的导流能力和长期稳定性都有重要影响^[11]。

综上,本文在定常流水力压裂的基础上采用脉冲压裂方式,在总结以往脉冲碎岩机理的基础上,揭示脉冲注液下的裂缝扩展机理;聚焦压裂过程中的水压响应情况,基于试验获得的多源监测数据,探究破裂面应力响应特征。本文的研究成果有助于深化对脉冲压裂裂缝扩展机理的理解,便于预测和控制裂缝发展方向和形态。在工程应用中,本文的研究成果对实际操作、设计优化、提升效率和提高资源开采安全性,以及减少环境影响具有重要的指导作用。

1 脉冲注液试验设置

1.1 试验样品与设备

实验选用湘东北燕山期花岗岩作为样本。将同源岩块切割为200 mm×200 mm×200 mm的立

方体试件,并剔除存在宏观裂隙的个体。在每块试件中心钻设注液钻孔。为确保试件表面平整度 ≤ 0.1 mm且垂直度偏差 $<0.01^\circ$,使用金刚石砂轮对其表面进行了精磨抛光处理。

模拟井筒的注液管如图1所示,采用不锈钢材料制成,注液管底端进行了封孔处理,在距离底端对称切割钻孔,并在距离底端处垫片,垫片以上区域为螺纹区,旨在增加摩擦力。

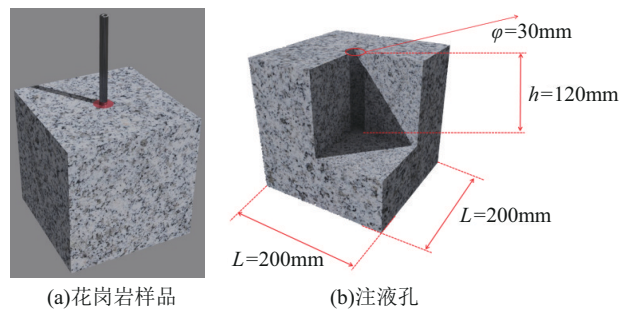


图1 花岗岩样品及注液孔

根据实验规范,制备了单轴压缩、巴西劈裂、真密度及孔隙度测试的标准样品,并保证样品直径及长度误差 <0.3 mm,端面平行度 $<0.1^\circ$ 。为避免实验误差,每种物理力学测试均至少进行3次,测试值取平均值。基本物理力学参数测试结果详见表1。

表1 样品基本物理力学参数

单轴抗压 强度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	泊松 比	真密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙 率/%
141.70	8.29	36.00	0.31	2.66	1.08

试验所采用的真三轴水力压裂模拟试验系统由本科研团队自主研发,如图2所示。该系统主要包括大尺寸真三轴围压系统、脉冲注液系统、加载系统、三维扫描系统以及其他辅助监测装置。

1.2 试验方案设置

室内注液物理模拟试验是研究裂缝扩展机理的有效手段。现场作业时,除储层性质、不连续面、地应力等自然因素外,可以通过工程因素的方式来控制和优化水力裂缝的产生,因此本文研究了地应力对裂缝扩展和微地震响应影响,同时设置固定的注液频率与速率作为对比,具体参数设置如表2所示,注液速率为0.2 ml/s,注液频率为0.2 Hz。

压裂试验结束后将试样取出,沿水力裂缝打开试样,使用三维形貌扫描仪对裂缝面进行扫描,获

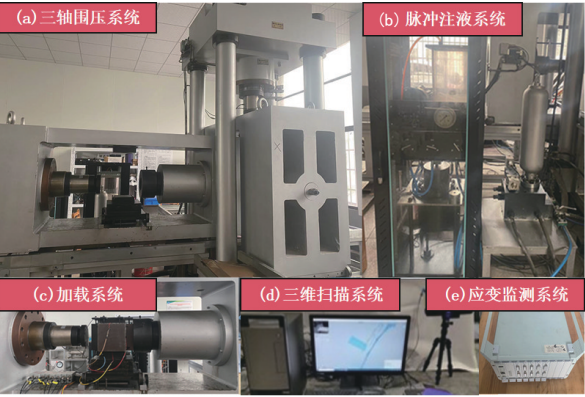


图2 真三轴水力压裂模拟试验系统

表2 考虑地应力影响的参数设置

编号	地应力/MPa	波速/(m·s ⁻¹)	压裂方式	压裂液
S1	3/4/6	3795	脉动	清水+示踪剂
S2	6/8/12	3874	脉动	清水+示踪剂
S3	9/12/18	3689	脉动	清水+示踪剂

取裂缝面的三维形貌数据。本试验采用固定扫描模式扫描裂缝面。由于试样的重力超过了转台的承载能力,因此需细调整扫描仪与裂缝面的角度与距离,使得整个裂缝面都处于扫描的范围内,以获取完整的扫描数据。扫描结束后,可以获取裂缝面初步的点云数据模型,然后需要对多余的点云数据进行剔除,最后导出点云数据至其他软件进行进一步的处理。试验过程如图3所示。

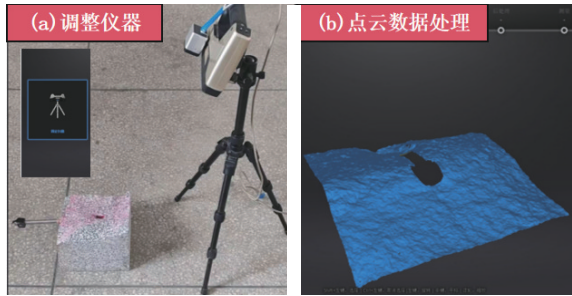


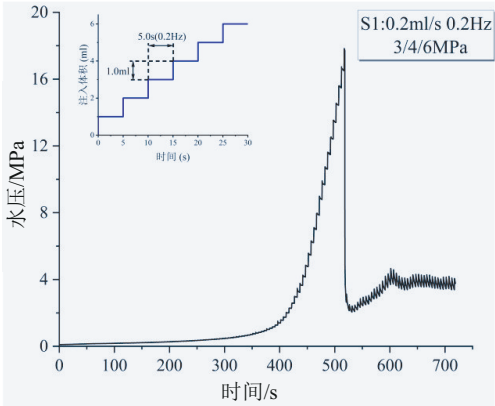
图3 裂缝面三维形貌扫描试验过程

2 基于水压特征参数的应力响应分析

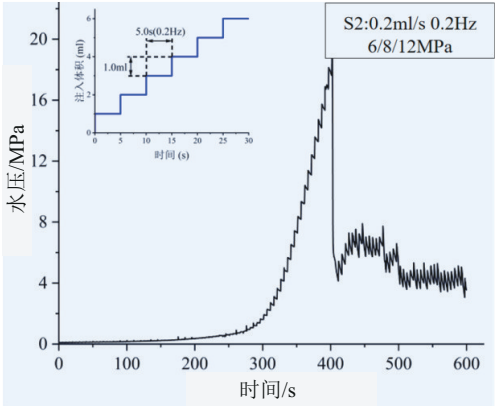
不同地应力下的水压曲线如图4所示,其中3组试验分别在3、4、6 MPa、6、8、12 MPa、9、12、18 MPa的围压条件下,注液参数按照时间-注入体积曲线(图4所示)进行,即5 s为一个周期,按照0.2 mL/s的注液速率进行注液。不同地应力条件下缝内水压曲线变化过程可以分为5个阶段:水压缓慢

增长段-水压迅速上升段-水压衰落段-水压二次上升段-水压稳定段。对照S1与S2组试验结果,高地应力条件下水压曲线呈现有所不同规律,即在9、12、18 MPa的地应力条件下,在水压二次上升后又出现了明显的压降,表明又出现了新的破裂。

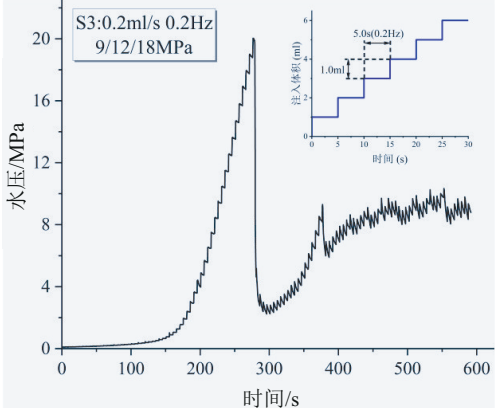
不同地应力条件下压裂特征参数规律变化如图5所示,图中横坐标以最小水平主应力为代表,以方便表述压裂特征参数与地应力之间的相关关系。



(a) S1水压



(b) S2水压



(c) S3水压

图4 不同地应力下的水压曲线

当最小水平主应力从3 MPa增加至9 MPa,破裂时间从517 s下降至276 s,下降幅度46.6%,线性拟合相关系数 $R_2=0.998$,破裂用时与最小水平主应力具有显著的线性相关性,随着最小水平主应力的增加,破裂用时呈线性减少。然而,在常规的水力压裂过程中,当最小水平主应力增加时,这就需要更高的流体压力来克服岩石内部的应力来产生破裂,在注液速率不变的情况下,破裂用时是增加的。这似乎和本试验的结果相悖,但在本试验中,采用脉冲注液的方式,重复产生流体压力,这就会导致岩石内部的微裂纹发展和损伤积累,岩石损伤程度的增加使得岩石整体强度下降,在较高的地应力条件下,加快了岩石破裂。压降与最小水平主应力之间没有明显的线性相关性,随着最小水平主应力的增加,压降呈先下降后升高的趋势,但整体上高地应力条件下的压降值大于中低应力条件下的压降值。

随着地应力的增大,破裂压力分别为17.8、18.8、20.0 MPa,破裂压力增加了16.9%,相关拟合

关系表明破裂压力与最小水平主应力呈显著正相关,相关拟合系数为 $R_2=0.994$,最小水平主应力越大,破裂压力越大,拟合公式可表述为:

$$P_f = 0.367\sigma_h + 16.67 \quad (1)$$

基于经典的H-W破裂准则:

$$P_f = 3\sigma_h - \sigma_H + \sigma_t - p_0 \quad (2)$$

式中: σ_t ——抗拉强度,MPa; p_0 ——初始地层孔隙流体压力,MPa。

试验中 $\sigma_H=4/3\sigma_h$,因此该准则可以简化为:

$$P_f = 5/3\sigma_h + \sigma_t - p_0 \quad (3)$$

式中破裂压力随最小水平主应力值的增大而增大,这与本文的研究结果相一致,因此在对最小水平主应力较高的地层进行注液时,就需要功率大、承压高的设备,这势必会增加工程作业的成本。

通过对比拟合公式和破裂准则发现,在不同最小水平主应力条件下,破裂压力不仅受到地应力的影响,还取决于注液方式、井筒直径以及岩石本身的性质等,当最小周向拉应力达到岩石的抗拉强度时,岩石就会发生拉张破坏。

3 基于粗糙度及分形理论的破裂效果评价

通过三维扫描数据对裂缝面进行定量评价,首先需利用三维形貌扫描装置对裂缝面进行数据采集获取裂缝面的点云数据,随后将点云数据导入软件进行填孔、降噪、对齐处理,最后利用Matlab建立裂缝面模型,另外为了更直观观察到裂缝面形貌,将z轴坐标放大,见图6。基于模型,本文主要对裂缝面的粗糙度和分形维数2个指标进行分析。

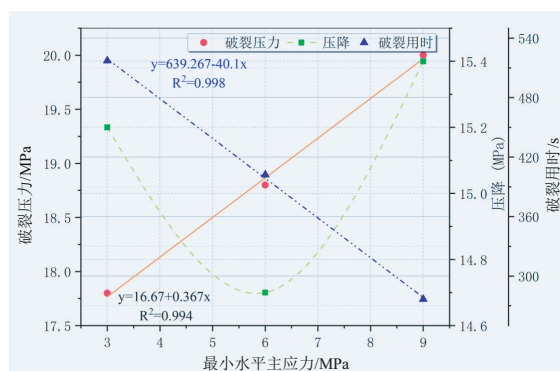


图5 不同最小水平主应力条件下压裂特征参数规律变化

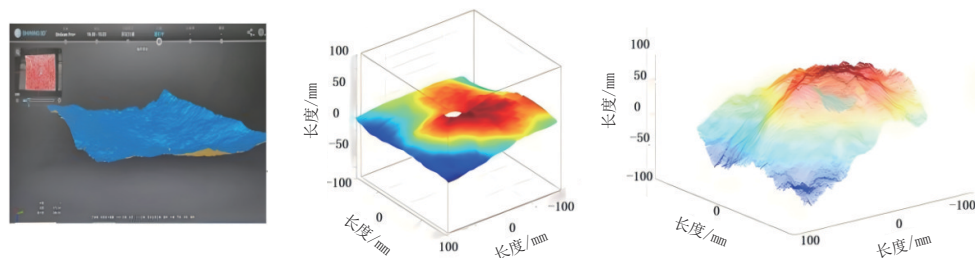


图6 三维数据采集、处理流程

为了对裂缝面的粗糙度和分形维数2个指标进行分析,需结合已建立的模型对已有粗糙度和分形维数计算理论进行优化以更好契合破裂面的定量评价与分析。

3.1 裂缝面粗糙度

裂缝面的粗糙度是指裂缝面的不平整程度,在裂缝扩展中,粗糙度越大越可能导致裂缝在扩展时发生偏转,形成更复杂的裂缝网络^[12]。此外,粗糙

度较高的裂缝面在上下两侧可以形成更为复杂的接触和嵌入,这可以增加裂缝面的摩擦力,提高裂缝的稳定性,并在一定程度上维持裂缝的开启状态。本文采用绝对平均粗糙度($\bar{\Delta}$)和基于功率谱密度(PSD)的粗糙度表征方法,来对裂缝面的粗糙度进行定量评价。

绝对平均粗糙度($\bar{\Delta}$)是一种较为简单的计算方法,主要取决于裂缝面扫描点的高度值,可以用下式进行计算:

$$\bar{\Delta} = \left[\sum_{j=1}^n (h_j - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i) \right] / n \quad (4)$$

式中: n ——三维扫描点云数据的个数; h_i, h_j ——第 i 和第 j 个扫描点所对应的高度值,mm。

基于功率谱密度的粗糙度表征方法提供了一种全面和系统的方式来量化表面粗糙度特征。功率谱密度是一种统计工具,它可以用于分析表面轮廓的频率组成,对处理后的表面轮廓数据进行傅里叶变换,将空间域的数据转换为频率域的数据,傅里叶变换后,每个频率分量的平方幅度就构成了功率谱密度。功率谱密度通常会随频率的增加而减小,表现为一个衰减的曲线。通过分析曲线的形状和斜率,可以对裂缝表面的粗糙度特征进行量化。三维表面形貌的二维傅里叶变换可以表示为^[13]:

$$H(f_x, f_y) = \lim_{l_x, l_y \rightarrow \infty} \int_{-l_x}^{l_x} \int_{-l_y}^{l_y} z(x, y) e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy \quad (5)$$

式中: f_x 与 f_y —— x 与 y 方向的空间频率; l_x 与 l_y —— x 和 y 方向上3D形貌连续表面的长度。

功率谱密度可以用Fourier变换进行计算^[14],即:

$$\begin{aligned} G(f_x, f_y) &= \lim_{l_x, l_y \rightarrow \infty} \frac{1}{4l_x l_y} H(f_x, f_y) H^*(f_x, f_y) \\ &= \lim_{l_x, l_y \rightarrow \infty} \frac{1}{4l_x l_y} \left| \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} z(x, y) e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy \right|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

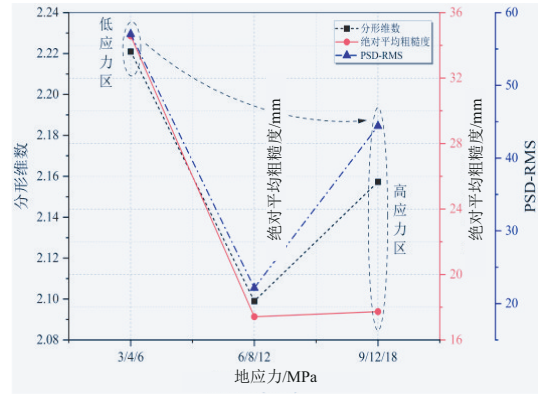
3.2 裂缝面分形维数

分形理论有助于获得三维裂缝特征的定量描述,当分形理论用于描述裂缝网络时,通常采用分形盒计数法定量描述裂缝分布的复杂性和密度^[15]。盒计数法是通过分析图像数据来计算孔隙或固体分形维数的常用且有效的算法。对于这种方法,使用不同边长 r 的方形(或立方体)盒子来覆盖2D(或3D)图像,并记录包含研究对象(例如点云数据) N

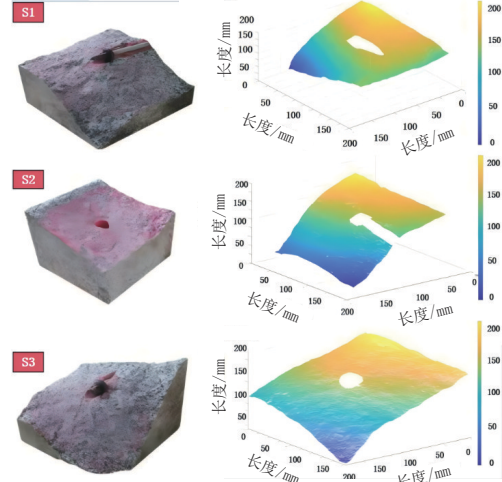
(r)的盒子数量。分形维数 D_f 可以通过式(7)计算:

$$D_f = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg(r)} \quad (7)$$

基于以上对破裂面评价方法计算理论,本文建立起不同地应力条件下裂缝面建模结果,根据建模数据分别计算了裂缝面的分形维数、绝对平均粗糙度和基于功率谱密度的粗糙度,结果见图7。当地应力从3、4、6 MPa增加至6、8、12 MPa,分形维数从2.221降低至2.1573;绝对平均粗糙度从34.58减少至17.73,减少了50.2%;PSD-RMS从57.06降低至44.42,减少了22.2%,随着地应力的增加,分形维数、绝对平均粗糙度和PSD-RMS均下降,这表明高地应力的压裂条件会降低裂缝面的复杂度和粗糙度。



(a) 不同地应力条件下破裂面量化表征



(b) 不同地应力条件下破裂面三维模型

图7 不同地应力条件下破裂面变化规律

地应力的方向和大小对裂缝的扩展方向和模式有决定性影响,图8为不同地应力下裂缝扩展效果,结合破裂面对应力响应特征做进一步探讨。一般而言,当最小主应力方向为垂向时,主要为水平

裂缝,反之产生垂向裂缝,裂缝的方向平行于最大主应力方向,垂直于最小主应力方向即PFD。在本研究中,S1、S2、S3地应力条件分别为3、4、6 MPa、6、8、12 MPa和9、12、18 MPa,S1主裂缝面沿PFD方向扩展;S3主裂缝面与注液孔呈约30°夹角方向扩展,逐渐偏向于沿最优断裂方向扩展,这主要归结于较高地应力使得水压更加难以克服裂缝尖端应力,使得裂缝面发生偏转。此外参见图7,在较高地应力条件下注液(S3)红色区域面积明显少于低地应力(S1),这表明较低的地应力条件可以有效地增加水力裂缝面积。

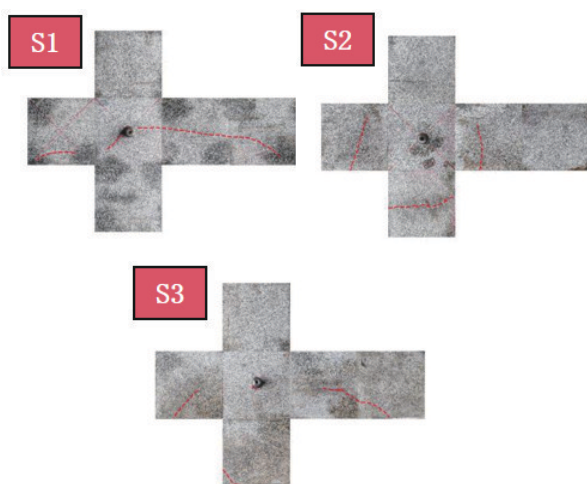


图8 不同最小水平主应力条件下试样平面展开图

4 结论与展望

本研究分别从宏观、细观角度分别探讨脉冲注液条件下围岩内部裂缝、破裂面对不同地应力的响应特征,建立基于三位形貌扫描的破裂面定量评价模型,并得到以下结论:

(1)在实验室尺度下分析了地应力对水压响应特征参数的影响,随着地应力的增加,破裂压力和压降呈增加趋势。

(2)探究了裂缝扩展特征并定量评价了破裂面粗糙度及分形特征较高的地应力抑制了裂缝的扩展使得主裂缝发生偏转,此外,在低地应力条件下有利于形成更大的裂缝面面积,得到高粗糙度的破裂面,且在该条件下的破裂面分形值也更高。

(3)考虑到储层地质条件复杂,未来需设置更复杂参数调控下的室内试验,并进一步结合现场钻

孔内脉冲注液试验验证,探讨受地应力调控下水压特征参数变化机理,从而建立特征参数与破裂面特征相互作用模型。

参考文献:

- [1] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地质前缘,2020,27(1):1-9.
- [2] Lu S M. A global review of enhanced geothermal system (EGS) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2902-2921.
- [3] Damani A, Sharma A, Sondergeld C, et al. Mapping of hydraulic fractures under triaxial stress conditions in laboratory experiments using acoustic emissions[C]. Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2012.
- [4] Zou Y S, Zhang S C, Zhou T, et al. Experimental investigation into hydraulic fracture network propagation in gas shales using CT scanning technology[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(1):33-45.
- [5] Hou B, Zhang R, Zeng Y, et al. Analysis of hydraulic fracture initiation and propagation in deep shale formation with high horizontal stress difference[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018,170:231-243.
- [6] 李龙,陈显举,彭安钰,等.贵州正安地区常压页岩气压裂关键技术[J].钻探工程,2022,49(5):189-193.
- [7] 邵长跃,潘鹏志,赵德才,等.流量对水力压裂破裂压力和增压率的影响研究[J].岩土力学,2020,41(7):2411-2421.
- [8] 张振,陈勇,杨天亮,等.分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究[J].水文地质工程地质,2021,48(2):89-96.
- [9] 陈江湛.动态水力脉冲作用下页岩储层损伤和裂缝扩展机理[D].长沙:中南大学,2022.
- [10] 胡光.层理性页岩力学参数对水力压裂裂缝形态的影响分析[J].钻探工程,2022,49(2):97-103.
- [11] Huang L, Sheng G, Chen Y N, et al. A new calculation approach of heterogeneous fractal dimensions in complex hydraulic fractures and its application[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022,219:111106.
- [12] 吴乙万,任志英,高诚辉,等.超精密光学镜片三维表面形貌参数评定方法研究[J].计量学报,2017,38(4):410-415.
- [13] Cai J, Tian Z, Wood D A. Pore-scale characterization and fractal analysis for gas migration mechanisms in shale gas reservoir [M]//Sustainable Geoscience for Natural Gas Subsurface Systems. Gulf Professional Publishing, 2022:1-27.
- [14] Liu Y, Xu T, Yuan Y, et al. A laboratory study on fracture initiation and propagation of granite under cyclic-injection hydraulic fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022,212:110278.
- [15] ITO T. Effect of pore pressure gradient on fracture initiation in fluid saturated porous media: Rock [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008,75(7):1753-1762.

(编辑 王文)