

真三轴大尺度致密砂岩水压致裂缝网演化的流固耦合作用机制

王洪建^{1, 2, 3, 4}, 尹博豪¹, 王永博¹, 许献磊⁴, 赵善坤^{3*}, 赵菲¹, 石晓闪², 王国柱⁵

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 中国煤炭科工集团 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室,

北京 100013; 3. 中国煤炭科工集团煤炭科学技术研究院有限公司 煤矿灾害防控全国重点实验室, 北京 100013;

4. 中国矿业大学(北京) 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083;

5. 中国石化中原油田分公司石油工程技术研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 致密砂岩水力裂缝扩展及缝网形成机制在深部能源开发中至关重要。为揭示注入排量对含天然裂隙致密砂岩水力裂缝行为的影响规律, 以四川普光地区致密砂岩为研究对象, 开展试样大小为 400 mm×400 mm×400 mm 的大尺度真三轴压裂试验, 运用声发射三维监测、同位素示踪及裂缝分形计算等手段, 系统分析 100, 200 及 300 mL/min 三种排量下的裂缝扩展过程。结果表明: 储层高石英含量(40.5%)与高脆性指数(64)是该储层形成复杂缝网的地质基础, 排量增大使水力裂缝增长率由 19.95% (100 mL/min) 增至 67.01% (300 mL/min), 分形维数由 1.102 2 增至 1.267 5, 裂缝形态由单一优势方向演化为复杂放射状缝网; 排量增大促使最大井孔压力由 68 MPa 增至 100 MPa, 声发射累计能量在排量 100~200 mL/min 时剧增 415.1%, 而在 200~300 mL/min 时增幅趋缓(6.1%), 表明高排量条件下能量释放趋于饱和; 声发射事件沿最大主应力方向(与井筒夹角≤45°)聚集, 分形维数时序曲线呈现“下降-上升-波动下降”三阶段特征, 揭示了损伤从无序萌生向有序贯通的演化规律; 理论分析表明破裂压力受注入速率与流体渗入竞争效应调控, 低排量时流体渗入主导, 破裂压力降低, 高排量时注入速率主导, 破裂压力升高。研究揭示了注入排量对致密砂岩水力裂缝扩展的影响规律, 为深部体积压裂施工参数优化提供重要理论依据。

关键词: 岩石力学; 真三轴; 水力压裂; 排量; 致密砂岩; 声发射; 分形特性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2026)06-1723-17

第一作者: 王洪建(1986-), 现任副教授, 主要从事深部岩石力学方面的研究工作。E-mail: wanghj@ncwu.edu.cn

***通信作者:** 赵善坤(1982-), 现任研究员, 主要从事冲击地压方面的研究工作。E-mail: zhaoshankuncom@163.com

Fluid-solid coupling mechanisms in the evolution of hydraulic fracture networks in large-scale true triaxial tight sandstone

WANG Hongjian^{1, 2, 3, 4}, YIN Bohao¹, WANG Yongbo¹, XU Xianlei⁴, ZHAO Shankun^{3*}, ZHAO Fei¹,
SHI Xiaoshan², WANG Guozhu⁵

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China; 3. National Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, CCTEG China Coal Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China; 4. State Key Laboratory of Fine

收稿日期: 2025-10-20; **修回日期:** 2025-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52474230); 河南省自然科学基金面上科学基金资助项目(252300421854); 中国煤炭科工集团煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室开放基金(SKLIS202421)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52474230), Natural Science Foundation of Henan Province (Grant No. 252300421854) and Open Funding of State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, China Coal Technology and Engineering Group (Grant No. SKLIS202421)

Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 5. Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China)

Abstract: The mechanism of hydraulic fracture propagation and fracture network formation in tight sandstone is essential for deep energy development. To investigate the influence of injection rate on hydraulic fracture behavior in tight sandstone containing natural fractures, this study conducted large-scale true triaxial fracturing tests on specimens measuring 400 mm × 400 mm × 400 mm from the tight sandstone in the Puguang area of Sichuan. By integrating three-dimensional acoustic emission monitoring, isotope tracing, and fractal analysis of fractures, we systematically analyzed the fracture propagation process under three injection rates (100, 200 and 300 mL/min). The results indicate that: (1) The high quartz content (40.5%) and high brittleness index (64) of the reservoir provide a geological basis for the formation of complex fracture networks. (2) As the injection rate increases, the hydraulic fracture growth rate escalates from 19.95% at 100 mL/min to 67.01% at 300 mL/min, while the fractal dimension increases from 1.102 2 to 1.267 5. The fracture morphology transitions from a single dominant direction to a complex radial network. (3) Increasing the injection rate raises the maximum borehole pressure from 68 MPa to 100 MPa, with cumulative acoustic emission energy surging by 415.1% when the rate increases from 100 mL/min to 200 mL/min, while the increase slows to 6.1% when the rate rises from 200 mL/min to 300 mL/min, indicating that energy release tends to saturate at high injection rates. (4) Acoustic emission events are concentrated along the direction of maximum principal stress (at angles $\leq 45^\circ$ to the wellbore). The time-series curve of the fractal dimension exhibits a three-stage characteristic: decline - rise - fluctuating decline, revealing the evolution of damage from disordered initiation to ordered connectivity. (5) Theoretical analysis indicates that breakdown pressure is influenced by the competing effects of injection rate and fluid infiltration. At low injection rates, fluid infiltration predominates, resulting in lower breakdown pressure, while at high injection rates, the injection rate dominates, leading to higher breakdown pressure. This study elucidates the influence of injection rate on hydraulic fracture propagation in tight sandstone and provides a crucial theoretical basis for optimizing parameters in deep volumetric fracturing.

Key words: rock mechanics; true triaxial; hydraulic fracturing; injection rate; tight sandstone; acoustic emission; fractal characteristics

First author: WANG Hongjian (1986 -), associate professor, is engaged in deep rock mechanics. E-mail: wanghj@ncwu.edu.cn

***Corresponding author:** ZHAO Shankun (1982 -), research fellow, is engaged in rockburst. E-mail: zhaoshankuncom@163.com

1 引言

致密砂岩气作为我国非常规天然气资源的重要组成部分,是保障能源安全及实现可持续发展的重要支柱^[1]。其普遍具有岩性致密、孔隙度低、渗透性差及强非均质性特征,导致常规压裂技术面临改造难度大、效果不理想等问题。在此背景下,体积压裂技术的应用成为提高储层渗透率的关键手段,而压裂液排量作为重要施工参数,对体积压裂效果具有显著影响。因此,开展不同排量条件下真三轴水力压裂对致密砂岩储层破坏特征的研究,不仅

对实现致密气资源的高效开发具有重要实践价值,同时对我国新时代能源发展的实施也具有重大意义^[2-3]。

体积压裂技术通过构造复杂裂缝网络实现储层“立体化”改造,已在国内外致密油气开发中得到广泛应用^[4-5]。在体积压裂机制研究方面,学者们普遍采用室内真三轴水力压裂物理模拟试验,以揭示裂缝扩展及缝网形成的演化机制。针对页岩水力压裂裂缝网络的复杂行为,T. K. Guo 等^[6]基于其开展的大尺度真三轴水力压裂试验,系统刻画了其生成机制与动态扩展规律。侯冰等^[7]利用真三轴压裂模拟装置,结合多通道声发射监测系统,明确了水力裂

缝与天然裂缝的相互作用机制;为开展页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征,郭印同等^[8]综合利用真三轴岩土工程模型试验机和Disp声发射定位系统,构建了一套相应的研究方法。排量大小对储层改造效果具有显著影响。借助室内真三轴水力压裂物理模拟系统,魏元龙等^[9]系统探讨了压裂液种类与施工排量等参数对裂缝形成机制的作用规律,并借此初步揭示了致密砂岩储层中水力裂缝的起裂、延伸及其空间展布特征。曾义金等^[10]针对深层页岩在高应力差条件下的缝网形成机制,证明低排量工况有利于激活原生天然裂缝,而高排量条件下水力裂缝倾向于直接穿透天然裂缝系统。杜涛涛等^[11]通过岩石力学测试与真三轴水力压裂物理模拟试验相结合的方法,明确了采用高黏度压裂液配合低排量施工会显著提高地层破裂压力,而提高排量则可有效缩短裂缝起裂时间。

现有研究对于深入理解致密储层岩石水力压裂破坏机制具有重要理论价值,但仍存在以下研究不足:首先,目前国内外多数室内水力压裂物理模拟研究受限于取芯成本和设备能力,普遍采用 $\phi 25\text{ mm} \sim \phi 100\text{ mm}$ 的圆柱样^[12]或边长 200 mm 以下的立方体试样^[13],值得注意的是,侯振坤等^[14]在研究中明确将边长为 300 mm 的立方体试样界定为“大尺寸试样”,这进一步表明,当前针对边长为 400 mm 及以上尺度的真三轴水力压裂试验研究仍显不足。其次,关于排量影响因素的研究多集中于裂缝扩展模式的定性分析,而针对不同排量条件下大尺寸真三轴水力压裂的系统性研究较为有限;更重要的是,目前尚缺乏排量与致密岩石水力压裂效果评价参数之间定量关系模型的建立。这些关键科学问题的深入研究,对于完善致密砂岩气藏体积压裂理论体系具有重要的科学意义。

基于上述研究现状,采用真三轴压裂试验系统,以四川普光及通南巴地区含天然原生裂隙的 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 致密砂岩岩样为研究对象,开展了3种不同排量条件下的致密砂岩水力压裂物理模拟试验,与小尺寸岩样相比,本研究采用 400 mm 大尺度试样的根本优势在于突破了小尺度试样(边长 $<300\text{ mm}$)的局限性,常规小尺度研究多揭示均质岩石中单一裂缝的扩展机制,而本尺度能够容纳更接近现场地质条件的复杂天然裂隙系统,从而直接揭示水力裂缝与预存裂隙相互作用形成三维缝网的全过程。试验过程中,综合运用声发射实时监测

技术和同位素示踪方法,实现了对裂缝扩展过程的全方位动态监测^[15],并据此构建水力裂缝空间分布图和分析内部裂缝扩展机制。同时重点研究了不同排量条件下致密砂岩水力裂缝网络的演化规律,以及天然裂缝在水力压裂作用下的扩展特征。研究成果可为致密气藏体积压裂优化设计和现场施工参数优选提供理论依据和技术支撑。

2 水力压裂试验方法

2.1 岩石样品

本研究所采用的岩石样本取自川东北(普光及通南巴地区)致密砂岩露头(见图1(a)),取样前已对风化表层进行系统剥离处理,后续物性与力学参数测试表明,该样品孔隙度为 2.3% ,渗透率为 $0.05 \sim 0.78\text{ mD}$,单轴抗压强度为 160 MPa ,属于典型的致密砂岩。为最大限度降低岩石非均质性影响,试验采用同一大体积砂岩块体切割加工制备标准试件,即 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的标准立方体试样(见图1(b))。通过X射线衍射(XRD)矿物定量分析表明,川东北砂岩主要矿物组成为:石英(40.5%)、长石(22.9%)、白云石(0.071%)、方解石(0.061%)及黏土矿物(36.4%)(见图1(c))。

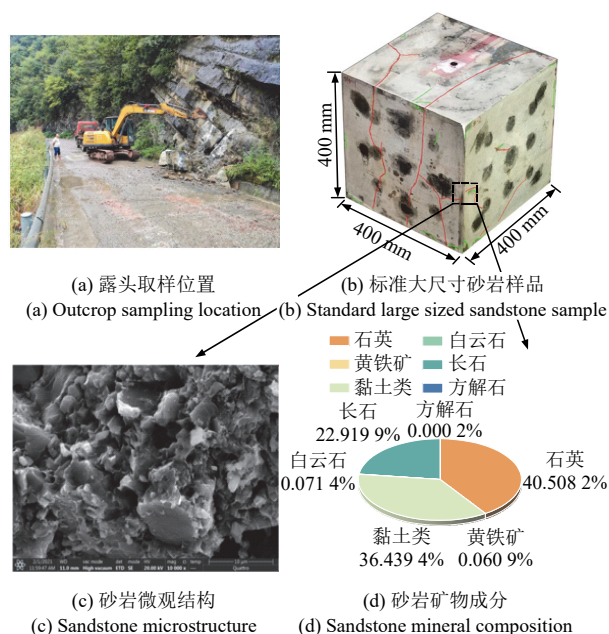


图1 川东北砂岩样品微观结构与矿物成分

Fig.1 Microstructure and mineral composition of sandstone samples in Northeastern Sichuan

基于标准^[16]中关于矿物脆性指数的计算方法,本研究通过类比分析的手段,对致密砂岩的矿物脆

性指数进行了定量计算，计算公式^[17-18]如下所示：

$$B_M = (X_{\text{石英}} + X_{\text{长石}} + X_{\text{白云石}} + X_{\text{方解石}} + X_{\text{黄铁矿}}) \times 100 \quad (1)$$

式中： B_M 为矿物脆性指数，量纲一； $X_{\text{石英}}$ ， $X_{\text{长石}}$ ， $X_{\text{白云石}}$ ， $X_{\text{方解石}}$ 以及 $X_{\text{黄铁矿}}$ 分别为样品中石英、长石、白云石、方解石和黄铁矿质量分数。经计算，致密砂岩试样的平均矿物脆性指数为64，依据分级标准判定其脆性等级为Ⅱ类(较好)^[19]。岩相学分析表明，该试样具有显著的石英优势矿物特征，平均含量高达40.5%，高硬度石英颗粒可有效传递应力，促进脆性断裂的形成，显著提升岩石的脆性响应。基于上述岩石力学特性，结合水力压裂工程实践经验，可以预测该致密砂岩储层具有较好的可压裂性，理论上能够形成复杂缝网系统。此外，基于国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)推荐标准，本研究系统测定了砂岩关键力学参数(见表1)。试验数据显示该砂岩具有典型的低渗透、低孔隙特性，这一特征对后续水力压裂试验设计具有重要指导意义。

2.2 试验设备及方法

本试验在中国科学院地质与地球物理研究所的大型真三轴水力压裂模拟系统上实施(见图2)。该系统的加载装置具备3 000 kN的三向压力输出能力，其加载控制精度可达±0.1 kN，同时提供的水压上限为120 MPa。高精度注射泵可实现0.01~500 mL/min的恒流注入，压力监测分辨率达±0.1% FS。力学与流体参数由数据采集系统同步记录。采用20个宽频传感器(频响范围为100~800 kHz)组成的声

发射定位系统呈空间阵列布置于试样除顶底外的4个侧面(见图3(b))，使用凡士林耦合并通过专用固定胶带固定，实时采集微破裂信息。

水力压裂试验样品的制备工序主要包括钻孔、扩孔、固井及固化。具体步骤为：(1) 在400 mm立方体标准试样的顶面中心，钻取一个φ25 mm×170 mm的初始井孔；(2) 于该井孔中心向下继续钻取φ8 mm×80 mm的裸眼段；(3) 井孔清理后，注入3M2216型环氧树脂胶并植入φ22 mm×170 mm的不锈钢井筒；(4) 静置固化24 h，使井筒与岩样形成可靠粘结(见图3(a))。

2.3 加载方案

致密砂岩储层普遍呈现高围压特征，结合现场地应力测试结果，将试验的三向应力设定为：上覆应力 $\sigma_v = 80$ MPa，最大水平主应力 $\sigma_H = 72.1$ MPa，最小水平主应力 $\sigma_h = 64.38$ MPa，由此计算得水平应力差为7.72 MPa，地应力差异系数为12%。试样坐标系定义如下：以预制井筒所在面为正面(X2)，其对面为背面(X1)，左侧面与右侧面分别标记为Y1和Y2，顶面与底面则为Z2和Z1。声发射传感器布设于X1，X2，Y1及Y2四个侧面，具体位置如图3(b)所示。应力加载方向为：沿X方向施加 σ_h ，沿Y方向施加 σ_H ，沿Z方向施加 σ_v 。试验选用黏度为10 mPa·s的滑溜水作为压裂液。为探究排量对压裂效果的影响及水力裂缝的起裂与扩展规律，分别在100，200及300 mL/min的排量下开展了大型真三轴水力压裂试验。

表1 川东北砂岩物理力学特性
Table 1 Physico-mechanical properties of sandstone in northeastern Sichuan Basin

密度(density)/ (g·cm ⁻³)	孔隙度 (porosity)/%	渗透率 (permeability)/mD	单轴抗压 强度(uniaxial compressive strength)/MPa	拉伸强度(tensile strength)/MPa	弹性模量(elastic modulus)/GPa	泊松比 (Poisson's ratio)	黏聚力 (cohesion)/MPa	内摩擦角 (internal friction angle)/(°)
2.652	2.3	0.05~0.78	160	16.2	22.6	0.1	18	25

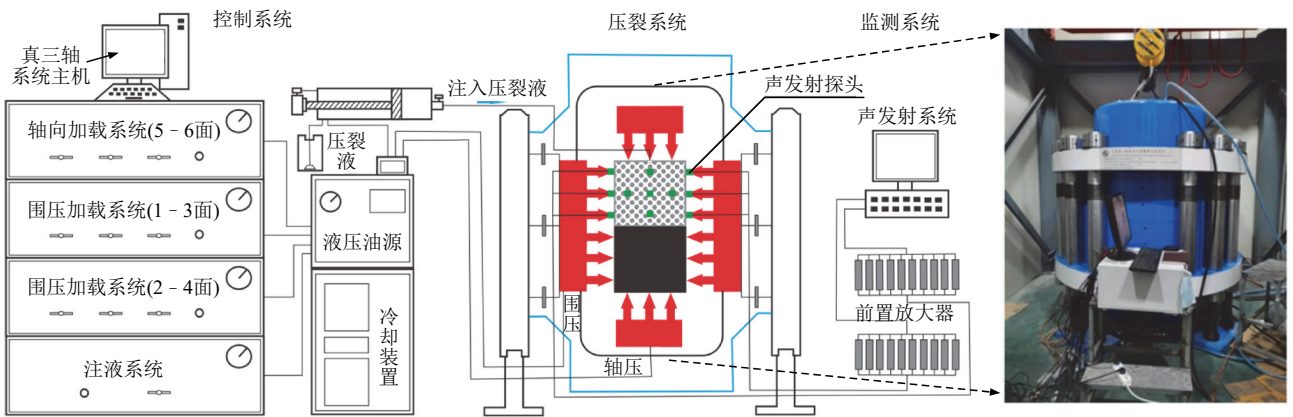


图2 水力压裂试验系统示意图及室内照片
Fig.2 Schematic overview of hydraulic fracturing test system and its photo in laboratory

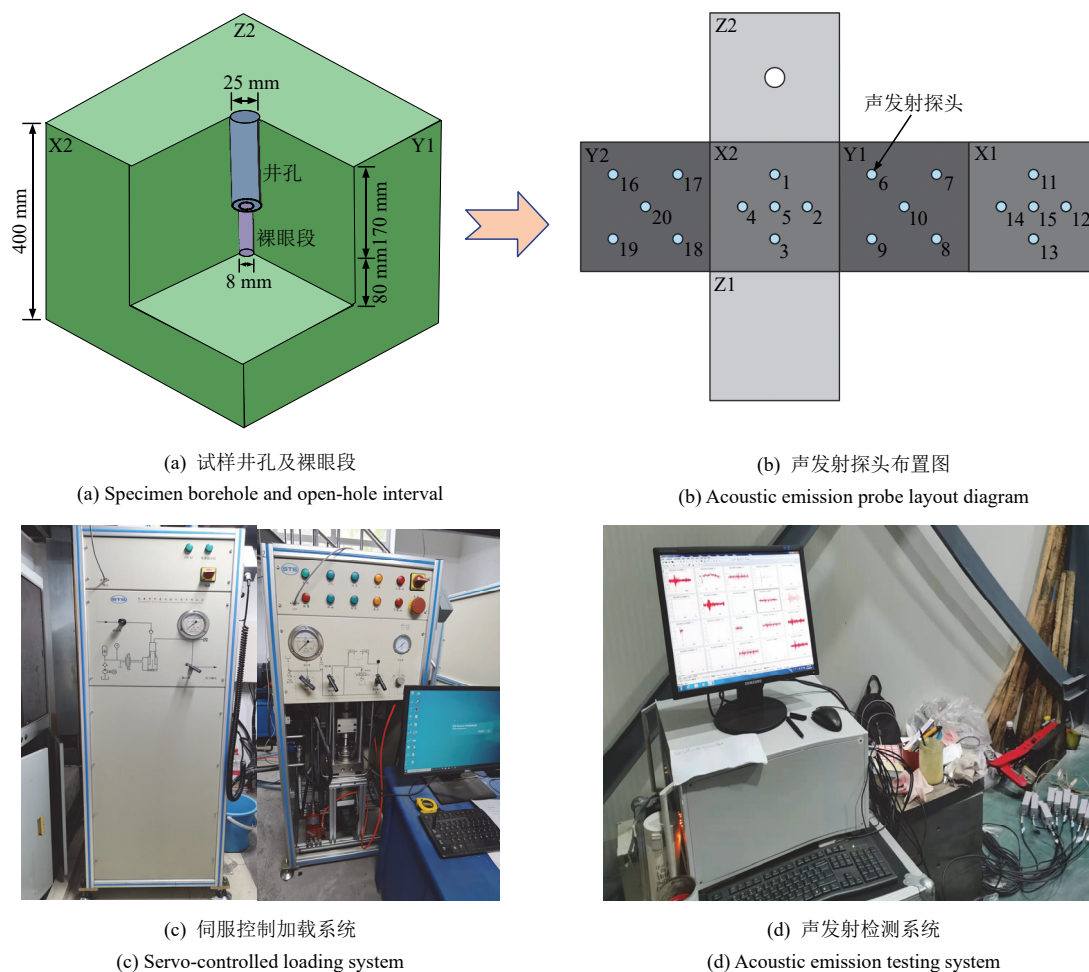


图 3 样品打孔与声发射探头布置及压裂系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of sample drilling, acoustic emission probe placement and fracturing system

3 试验结果分析

3.1 水力裂缝形态

本节通过对压裂后试样 6 个外表面的细致观测, 标记所有可见的新生裂缝(绿色标记)与原生裂缝(红色标记)并绘制表面展开图(见图 4~6), 以直观展示裂缝在试样表面的形态、长度及连通性。需要说明的是, 表面展开图主要反映的是裂缝穿透至试样外表面的痕迹。对于完全在试样内部发育、未贯通至表面的裂缝, 此方法无法直接观测。然而, 结合后文声发射三维实时定位技术对压裂过程中内部微破裂事件的监测, 以及压裂后试样剖切与同位素示踪的辅助分析, 能够对水力裂缝的整体空间展布趋势和主要破裂面的空间几何形态进行综合推断和验证, 综合运用声发射实时监测技术和同位素示踪方法, 实现了对裂缝扩展过程的全方位动态监测, 并据此构建水力裂缝空间分布图和分析内部裂缝扩

展机制。图 4 为 100 mL/min 排量条件下, 压裂后砂岩 S-1 裂缝空间分布及表面展开图, 可以观察到岩石表面有少量天然裂缝, 且具有一定的迂曲度, 可以发现主水力裂缝主要集中在 X2 面, 该主水力裂缝是沿着最大主应力方向从 Z2 面上的天然裂缝 a 处起裂的次生裂缝, 其平直扩展直至突破发育至 X2 面继续垂直向下扩展, 在斜向原生裂缝 b 处止裂。为了量化揭示水力裂缝特性, 反映原生裂缝对新生裂缝发育的影响, 采用 Image-Pro Plus 软件将砂岩压后表面展开图中所有原生裂缝和新生裂缝的长度进行量测。裂缝增长率(K)能够反映岩石在压裂后的裂缝变化情况, 可以表征统计区域内新生裂缝的发育程度, 计算公式如下:

$$K = \frac{\text{新生裂缝长度}}{\text{原生裂缝长度}} \times 100\% \quad (2)$$

经测量统计砂岩 S-1 原生裂缝总长 2279.56 mm, 新生裂缝总长 454.83 mm, 裂隙增长率为 19.95%。

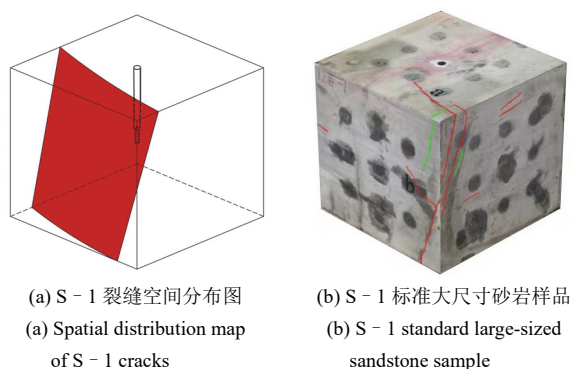


图 4 砂岩 S - 1 压后裂缝空间分布及裂缝展开图

Fig.4 Spatial distribution and unfolded surface view of fractures in sandstone sample S - 1 after compression

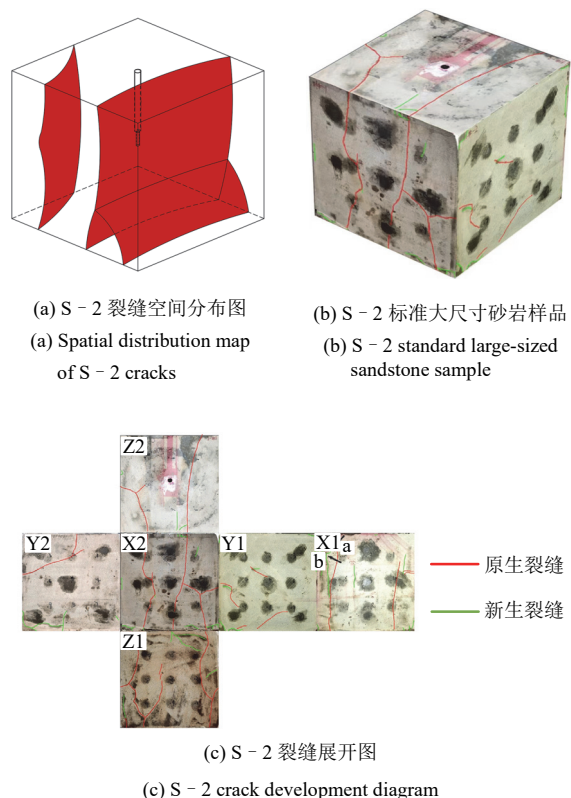


图 5 砂岩 S - 2 压后裂缝空间分布及裂缝展开图

Fig.5 Spatial distribution and unfolded surface view of fractures in sandstone sample S - 2 after compression

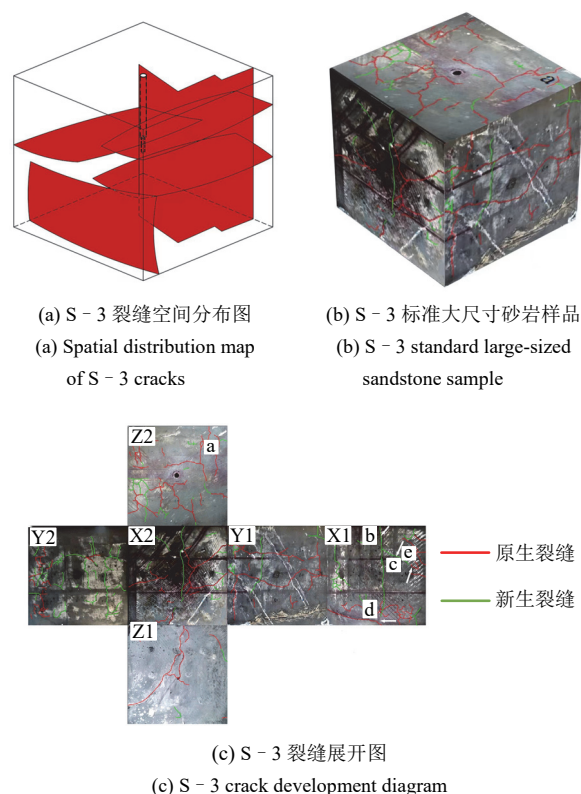


图 6 砂岩 S - 3 压后裂缝空间分布及裂缝展开图

Fig.6 Spatial distribution and unfolded surface view of fractures in sandstone sample S - 3 after compression

图 5 为 200 mL/min 排量下, 压裂后砂岩 S - 2 裂缝空间分布及表面展开图, 可以观察到岩石表面有较多新生裂缝在 Z1, Z2, X1, Y2 四个面沿着横向或纵向贯通, 与 S - 1 试样相比, S - 2 压裂后新生裂缝长度以及缝网复杂程度显著增高。在 X1 面上底部, 主水力裂缝 b 是从 X1 面上的天然裂缝 a 处起裂的次生裂缝, 沿着最大主应力方向, 当其到达天然裂缝 a 的下端时止裂。在 X1 面上底部, 主水力裂缝 b 经测量统计砂岩 S - 2 原生裂缝总长 4 649.57 mm, 新生裂缝总长 2 474.1 mm, 裂隙增长率为 53.21%。

图 6 为 300 mL/min 排量条件下, 压裂后砂岩 S - 3 裂缝空间分布及表面展开图, 可以观察到岩石表面有较多天然裂缝, 且新生裂缝在 X1, X2, Y2, Z2 四个面或沿着横向或纵向贯通, 与 S - 1, S - 2 相比, S - 3 压裂后新生裂缝长度以及缝网复杂程度进一步增高。在 X1 面上底部, 主水力裂缝 b 自天然裂缝 a 启裂后, 沿端部向下延伸扩展; 与此同时, 主水力裂缝 a 中还衍生出次生水力裂缝 c, 该次生裂缝 c 在延伸至天然裂缝 e 处时发生止裂。随着排量的增大, 主水力裂缝 b 持续向下扩展, 当其前缘靠近天然裂缝 d 时, 因具备足够的能量而直接贯穿

了该天然裂缝。在 X1 面上底部，主水力裂缝 b 经测量统计砂岩 S-3 原生裂缝总长 8 146.35 mm，新生裂缝总长 5 458.95 mm，裂隙增长率为 67.01%。

3.2 水力裂缝分形特性

为定量表征裂纹形态的复杂程度，本研究采用盒计数法进行裂缝分形维数计算。该方法能量化描述裂缝的复杂程度，因其几何定义明确、算法实现简便等优势，在分形几何分析中得到广泛应用^[20-21]。盒计数法的数学原理可表述为：当分形结构(集合 A)被划分为边长为 δ 的 n 个正交网格单元时，若存在分形维数 D 使得当 $\delta \rightarrow 0$ 时满足：

$$N(A, \delta) \propto \frac{1}{\delta^D} \quad (3)$$

则集合 A 的盒维数可定义为

$$D(A) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N(A, \delta)}{\lg(1/\delta)} = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N(A, \delta)}{\lg \delta} \quad (4)$$

具体计算过程如下：首先，为提高特征辨识度与计算效率，将原始水力裂缝彩色图像(见表 2 第一列)转换为二值化图像并通过自适应阈值处理保留

裂缝主结构(见表 2 第 2 列)，选取网格单元 δ ，统计覆盖裂纹区域所需的最小网格数 $N(A, \delta)$ ，在双对数坐标系中绘制 $(-\ln \delta, \ln N(A, \delta))$ 散点图，采用最小二乘法进行线性拟合(见表 2 第 3 列)，拟合直线斜率绝对值即为裂缝分形维数 D ，同时拟合系数 R^2 可以评估拟合度(见表 2 第 4 列)。

对比可以发现，3 组砂岩试样拟合相关系数 R^2 均在 0.99 以上，说明 3 组试样表面的水力裂缝分布形态具有较好的几何分形特征，即有良好的自相似性。分形盒维数值的大小可以表征岩体表面水力裂缝网络形态特征，其值越大，水力裂缝的自相似性越高，裂缝缝网形态越复杂。由表 2 可知，裂缝的分形维数随着排量的增大而增大，当排量由 100 mL/min 增加至 200 mL/min 时，分形维数由 1.102 2 增加至 1.176 5，增长 7.73%，当排量增加至 300 mL/min 时，分形维数增加至 1.267 5，增长 15.00%。由此可见排量增加会产生更多相互交错的水力裂缝从而使得分形维数增大，进一步说明大排量的水力压裂效果更好。

表 2 水力裂缝分形结果

Table 2 Fractal results of hydraulic fractures

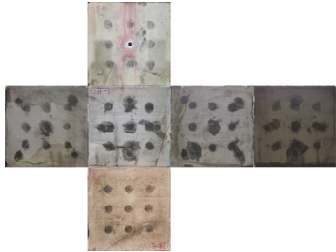
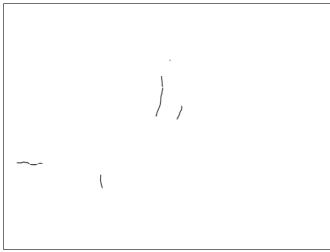
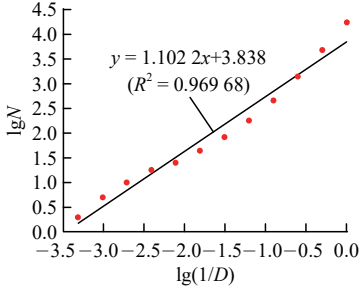
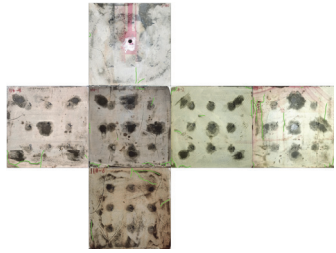
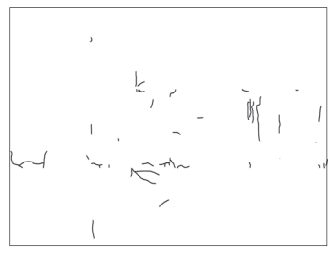
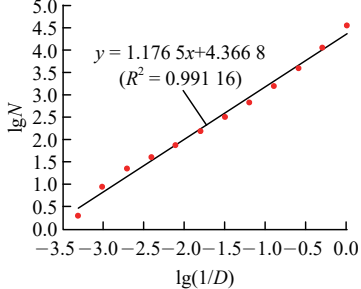
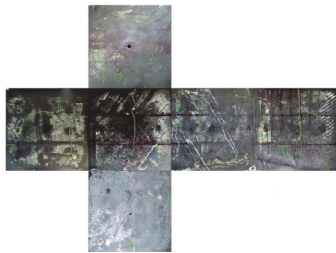
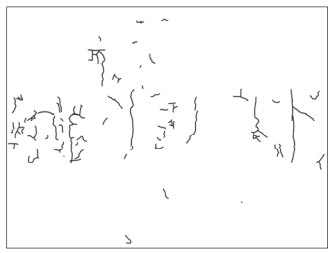
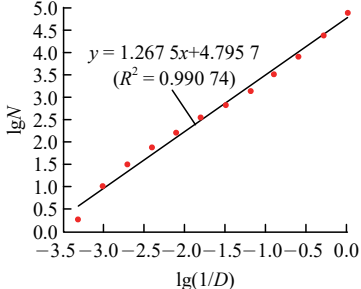
编号 (No.)	试样表面水力裂缝形态(morphology of hydraulic fractures on specimen surface)	表面新生水力裂缝二值化(binarization of surface newly generated hydraulic fractures)	线性拟合(linear fitting)	分形结果 (fractal results)
S-1				$D = 1.102\ 2$ $R^2 = 0.969\ 68$
S-2				$D = 1.176\ 5$ $R^2 = 0.991\ 116$
S-3				$D = 1.267\ 5$ $R^2 = 0.990\ 74$

图 7 为水力裂缝增长率、水力裂缝分形维数与排量的关系图,可以发现裂缝增长率与排量、分形维数与排量之间均存在良好的正相关关系,通过线性拟合可以确定 $K=0.2353Q-0.3367$, $D=0.000827Q+1.02$ 。相关系数 R^2 均在 0.95 以上,拟合效果良好。随着排量 Q 的增大,增长率 K 和分形维数 D 均呈现线性增长趋势,这说明大排量能产生更多更复杂的水力裂缝。需要说明的是,上述线性拟合公式是基于本试验 100~300 mL/min 排量区间数据得到的经验关系,主要用于揭示该区间内参数的增长趋势。该关系在排量趋近于零时不适用,实际裂缝扩展存在临界启动排量。

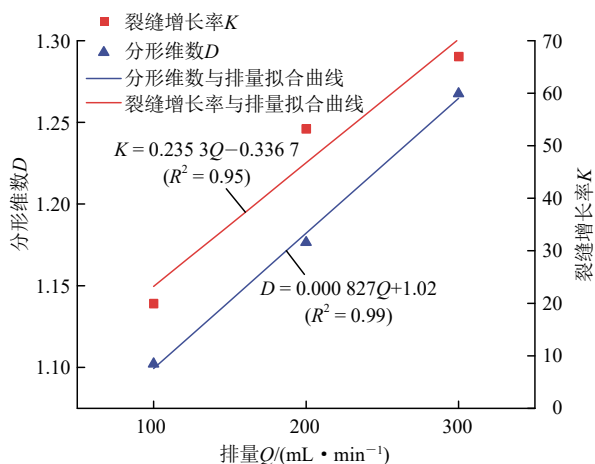


图 7 水力裂缝增长率、分形维数与排量相关性

Fig.7 Correlation among hydraulic fracture growth rate, fractal dimension and displacement

结合节 3.1 所述,尽管 3 个试样的初始天然裂隙总长差异显著(2 279.56, 4 649.57, 8 146.35 mm),但排量对裂缝扩展的促进效应表现出明显的系统性规律。首先,单位原生裂隙长度的裂缝增长率随排量增大而显著提升(19.95%→53.21%→67.01%),说明高排量下裂缝延伸效率更高。其次,在表征裂缝复杂度的分形维数上,所有试样均呈现一致趋势:分形维数随排量增加而系统性增长(1.102 2→1.176 5→1.267 5)。这表明提高排量能显著促进裂缝网络复杂化,且该效应不受初始裂隙差异的影响,进一步证实排量是克服储层非均质性、实现高效体积改造的关键工程参数。

3.3 水力裂缝方位分布

水力裂缝方位分布是实现精准“地质-工程一体化”的核心输入参数。为量化分析水力裂缝的扩展方向及其与施加应力场的关联,本研究统一采用基于试样坐标系的方位角进行描述。定义最大水平主应力方向(即 Y 轴正方向)为 0° 参考基准,方位角按右手定则绕 Z 轴(上覆应力 σ_v 方向)从 Y 轴正方向开始逆时针

旋转增加(0° 至 360°)。因此, X 轴正方向(最小水平主应力 σ_h 方向)对应 90° , Y 轴负方向对应 180° , X 轴负方向对应 270° 。对岩石表面所有新生裂缝的走向进行统计,绘制了以方位角为函数的裂缝数量玫瑰图,如图 8 所示。

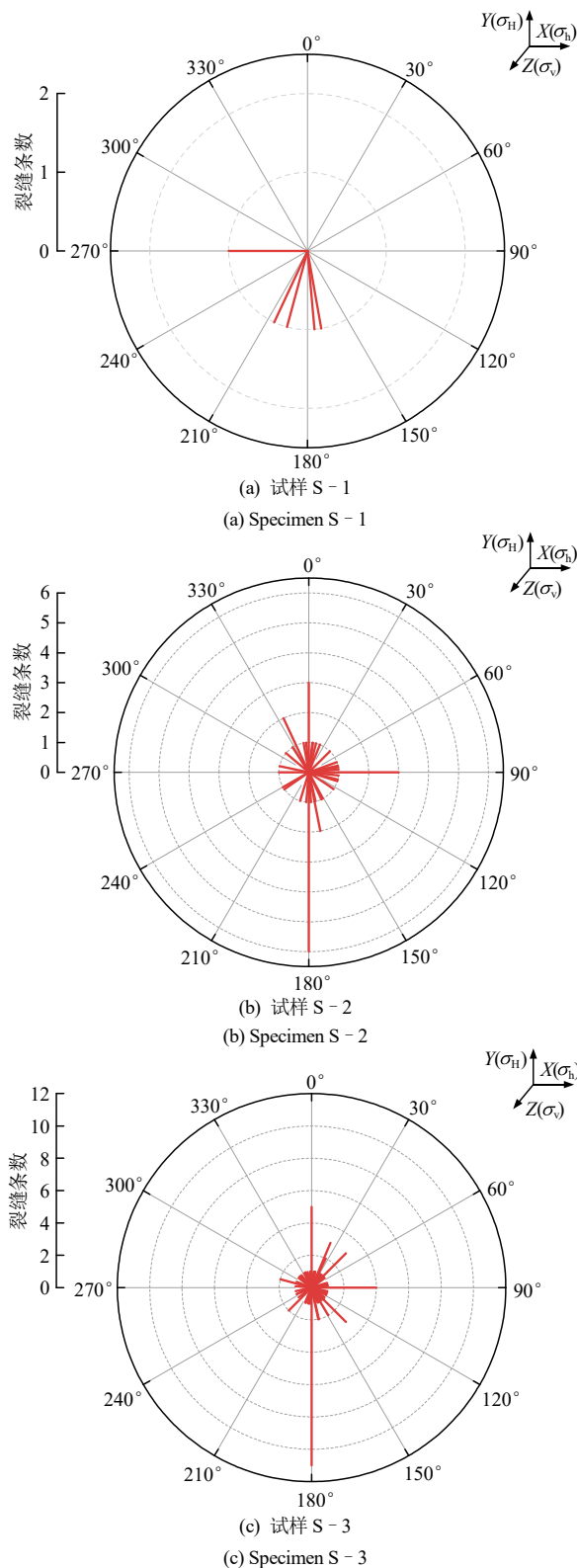


图 8 水力裂缝分布方位玫瑰图

Fig.8 Rose diagram of hydraulic fracture orientation

分析发现不同试样裂缝扩展呈现显著各向异性特征,对于试样 S-1(100 mL/min),新生裂缝数量较少(共 5 条),其优势扩展方位集中在 $150^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 范围。此区间主要覆盖了 X 轴负方向(270°)附近及向 Y 轴负方向(180°)过渡的区域。值得注意的是,该优势方位区间总体上与最小水平主应力 σ_h 的方向(X 轴, $90^{\circ}/270^{\circ}$)近乎垂直,符合低排量下形成单一主裂缝受应力场控制、沿最大主应力方向(Y 轴, $0^{\circ}/180^{\circ}$)扩展的理论预期,但因裂缝数量少,统计分布略显分散。随着排量增大,试样 S-2 和 S-3 的裂缝方位分布呈现出更明显且集中的规律性。两者的新生裂缝优势方位均高度集中于与 Y 轴(即 $0^{\circ}/180^{\circ}$ 线)夹角 $\pm 30^{\circ}$ 的范围内,清晰指向最大水平主应力 σ_h 的方向。例如, S-2 试样在此方向产生的裂缝最多达 6 条(总计 43 条),而 S-3 试样在此方向最多达 11 条(总计 94 条),由此证明,裂缝的主体延伸方向仍然由 σ_h 方向主导。可以发现,水力裂缝扩展表现出显著的各向异性特征,且与施加的应力场高度相关。裂缝优势方位主要集中在与 Y 轴(σ_h 方向)夹角 $\pm 30^{\circ}$ 的范围。可以发现,水力裂缝扩展表现出显著的各向异性特征,且与施加的应力场高度相关。裂缝优势方位主要集中在与 Y 轴(σ_h 方向)夹角 $\pm 30^{\circ}$ 的范围。

此外,相较于 S-1, S-2 和 S-3 试样在高排量下产生的裂缝,其方位在以 Y 轴($0^{\circ}/180^{\circ}$)为中心的基础上,呈现出向四周一定程度的放射状扩散(见图 8)。这揭示了在高排量、高流体能量驱动下,水力裂缝在优先沿 σ_h 方向扩展的同时,更有能力激活或沟通那些与主应力方向呈不同夹角的天然裂缝(如图 5, 6 所示),或引起裂缝尖端局部应力重定向,从而导致次生裂缝方位的多样化。然而,沿 σ_h 方向的裂缝在数量上始终占据绝对优势,表明地应力差异($\sigma_H > \sigma_h$)是控制裂缝网络主干延伸方向的第一性因素。这一观测结果与后文中声发射事件主要沿 Y 轴方向聚集,且高排量下出现分叉“事件簇”的发现完全一致,共同揭示了排量对缝网复杂化的促进作用。

3.4 泵压曲线及破裂应力

试验中,对压裂全过程的井孔压力时序数据与声发射振铃计数进行了同步采集与记录,结合注液排量大小,绘制泵压曲线、注入流量以及声发射振铃计数随时间变化曲线,如图 9 所示。振铃计数是指监测过程中声发射波形信号幅值超过设定阈值值的振荡次数,它代表了岩石内部裂隙的扩展频率,其变化趋势也能够直接反映岩石内部裂纹产生扩展的规律^[22-23]。结合井孔压力变化曲线特征以及声发射

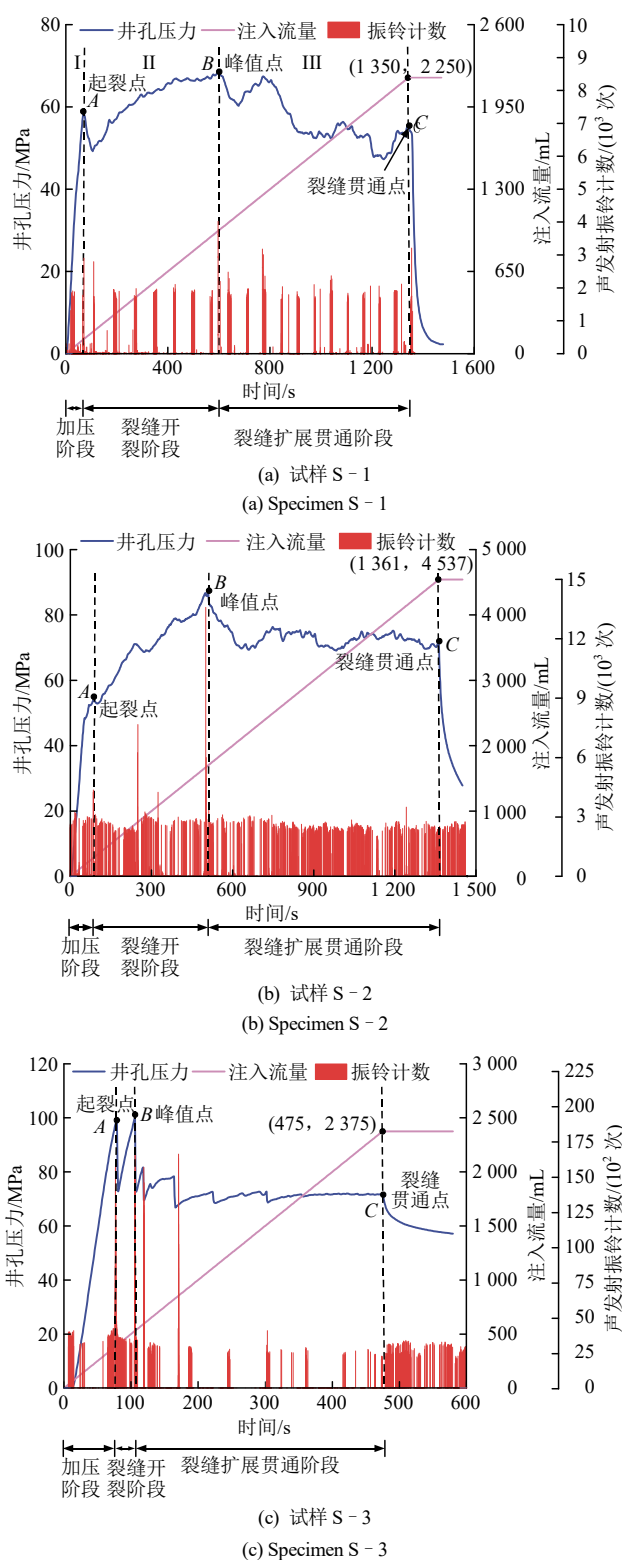


图9 试验全过程井孔压力、注入流量与声发射振铃计数和时间关系曲线

Fig.9 Curves of borehole pressure, injection flow and AE ringing counts versus time throughout the test

振铃计数信号强弱,确定出起裂点(A点)、峰值点(B点)和裂缝贯通点(C点),基于井孔压力与裂缝行为的演变特征,可将压裂试验过程划分为孔压平衡、起裂及贯通流动3个阶段。

从图 9 中可见, 试样 S-1, S-2, S-3 在孔压平衡阶段, 井孔压力曲线近似呈线性上升趋势, 注入流量分别以排量速度线性增长, 该阶段对应总时长为 52, 87 和 79 s, 总排量大小分别为 87, 290 和 395 mL。对应的起裂点 A 点处应力分别为 58, 54 和 98 MPa。岩石在孔压平衡阶段主要发生内部原生孔隙、微裂隙闭合压密, 很少有新生裂隙产生, 声发射振铃计数处于相对较低水平, 最大仅为 1 500~3 000 次。随后, 井孔压力超过起裂点压力, 岩石内部开始出现新生水力裂缝, 进入起裂阶段, 由于井孔压力呈现大幅度波动上升趋势直至增大到峰值点, 注入流量继续以排量速度线性增长, 该阶段结束时对应时间为 608, 509 和 106 s, 总排量大小分别为 952, 1 697 和 540 mL, 对应峰值点 B 点处应力分别为 68, 86 和 100 MPa, 而振铃计数分别为 4 236, 13 824 和 17 826 次。由于岩石在起裂阶段主要发生原生水力裂缝扩展发育, 伴随有新生水力裂缝萌生, 声发射事件相对密集出现, 振铃计数活跃性增强, 同时可能有少量水力裂缝不断扩展发育连接, 形成了大尺度主裂缝破裂, 因此该过程中偶有较大振铃计数出现, 例如试样 S-1 在 53 s 出现 804 次, 试样 S-2 在 251 s 出现 2 312 次以及试样 S-3 在 78 s 出现 2 088 次振铃计数。当井孔压力增大到峰值点处, 振铃计数达到最大值, 分别为 1 097, 4 120 和 2 224 次。当注入液流量继续以拟定排量持续线性增长, 岩石进入贯通流动阶段, 井孔压力曲线开始显著下降随后缓慢波动变化, 声发射振铃计数以相对较低水平密集出现, 例如, 试样 S-1 在 783 s 出现最大振铃计数 814 次, 试样 S-2 在 1 238 s 出现 1 085 次, 试样 S-3 在 172 s 出现 2 114 次, 岩石内部小尺度水力裂缝缓慢贯通发育、连接形成大尺度破裂, 最终在裂缝贯通点处, 形成贯通破裂面, 岩石被压裂试验结束。试样 S-1, S-2, S-3 该阶段结束时对应时间为 1 350, 1 361, 475 s, 总排量大小分别为 2 250, 4 537 和 2 375 mL。对应裂缝贯通点应力分别为 56, 71 和 72 MPa, 而振铃计数分别为 833, 877 和 332 次。

绘制不同排量条件下最大井孔压力与声发射累计能量, 如图 10 和 11 所示, 可以看出, 随着排量从 100 mL/min 增大至 300 mL/min, 最大井孔压力与声发射累计能量整体均呈上升趋势。其中, 当排量从 100 mL/min 增大到 200 mL/min 时, 最大井孔压力从 68 MPa 增大到 86 MPa, 增幅 26.5%, 声发射累计能量从 285.69 $\times 10^3$ aJ 增大到 1 471.57 $\times 10^3$ aJ, 增幅 415.1%。

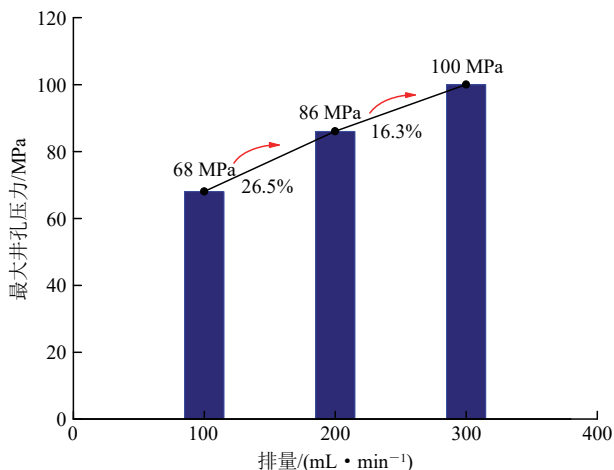


图 10 不同排量对最大井孔压力的影响关系图

Fig.10 Relationship between injection rate and the maximum borehole pressure

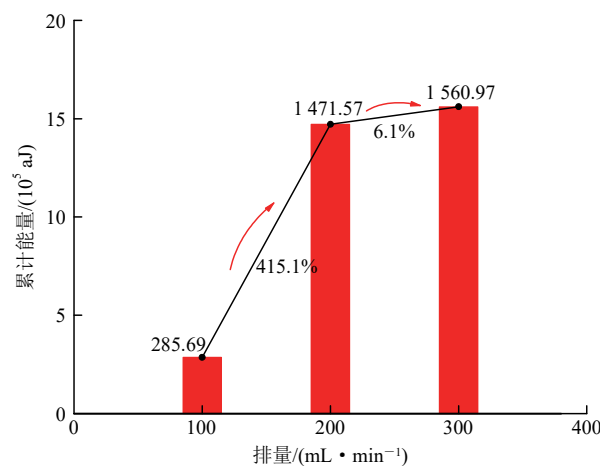


图 11 不同排量对声发射累计能量影响关系图

Fig.11 Relationship between injection rate and cumulative acoustic emission energy

当排量从 200 mL/min 增大到 300 mL/min 时, 最大井孔压力从 86 MPa 增大到 100 MPa, 增幅 16.3%, 声发射累计能量从 1 471.57 $\times 10^3$ aJ 增大到 1 560.97 $\times 10^3$ aJ, 增幅 6.1%。

由此可见, 排量的增大会提高井孔压力及累计声发射能量。由低排量提升至较高排量时(100 mL/min 增大至 200 mL/min), 能量释放量增大效应显著, 排量加大增强了裂缝尖端能量积累与释放, 促进更大范围的岩石破裂。进一步提升排量时(200 mL/min 增大至 300 mL/min), 能量释放量增长趋缓, 反映能量释放存在饱和效应。因此, 对于特定储层, 在压裂方案设计时存在最优的排量, 实现经济与改造效果的“双丰收”。

4 裂缝演化过程的声发射特征分析

4.1 岩体破裂声发射三维定位

基于声发射三维空间定位技术, 能够更为深入解析

岩石材料声发射行为及其内部微裂缝萌生位置、损伤分布特征以及动态延伸演化机制^[24-25]。声发射事件的空间坐标代表微裂缝的萌生位置,在空间分布上呈现出显著的有序性特征,这是因为宏观尺度下岩石微裂缝的扩展轨迹展现出明确的规律性。这种空间关联性表明,声发射信号的集聚区域与岩石内部应力集中带及高水力裂缝扩展贯通区存在显著的空间耦合效应^[26-27]。

通过图 12 所示的真三轴水力压裂加载全过程声发射震源的空间分布特征可以看出,声发射定位点主要分布在钻孔周围,且分布范围基本都类似“椭圆形”。图 12(a)是试样 S-1 的声发射信号空间分布特征,声发射信号点以井筒为核心密集分布,并沿相交于井筒 45° 的斜面逐步延伸,该方向与最大主应力方向(Y 轴)高度一致,最终构成一个主斜向裂隙平面,这一内部破裂聚集面与试样 S-1 压裂后在 X2 面观察到的单一、平直且沿最大主应力方向延伸的主水力裂缝(图 4 中新生裂缝)在空间位置和扩展方向上完全吻合。对于图 12(b)所示的试样 S-2,受排量增大的影响,其声发射信号点的密集度明显提升,同样形成了一个相交于井筒 45° 的主斜向裂隙平面;更为重要的是,信号点从井筒底端分叉,以条带状聚集形态向外扩展,形成了 2 个额外的斜向次生裂隙平面簇:其中一个沿井筒垂直向下延伸,另一个与井筒呈近似 135° 的夹角,这种内部的多平面破裂结构,外在地表现为试样 S-2 在 Z1, Z2, X1, Y2 四个面上出现的多向贯通的新生裂缝网络(见图 5)。声发射事件的“分叉”与“多簇”分布特征,正是内部裂缝起裂点增多、扩展路径复杂化的直接证据,预示并解释了表观上缝网复杂度的显著提升。图 12(c)展示的是试样 S-3 的声发射信号空间分布。随着排量的进一步增大,信号点的密集度进一步提高。一方面,沿最大主应力方向延伸出的主斜向裂隙平面依然是最显著的特征;另一

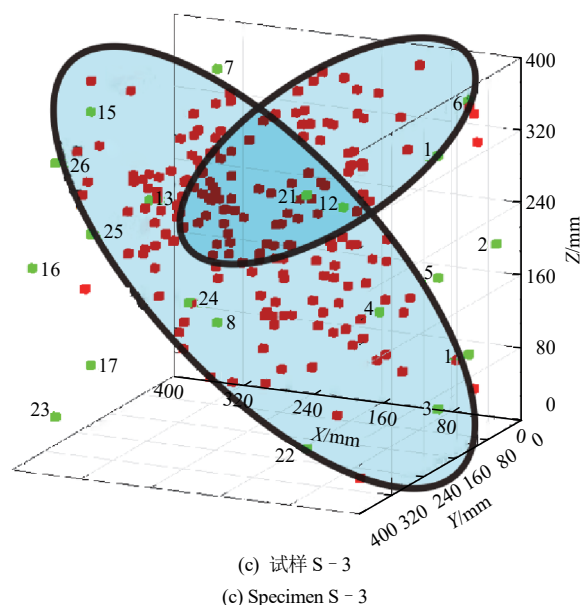
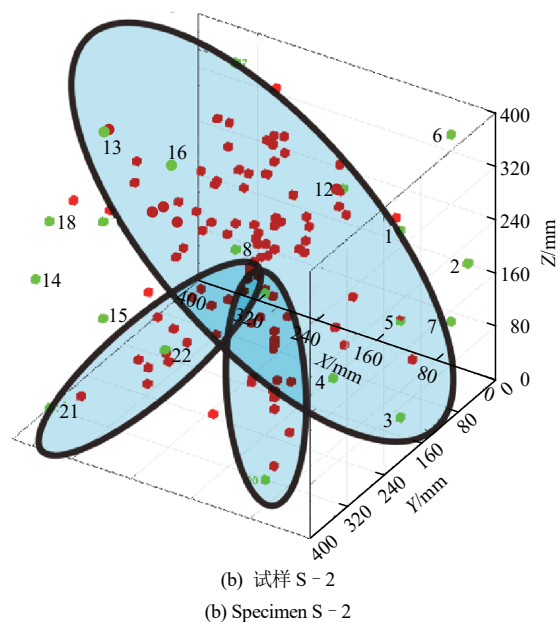
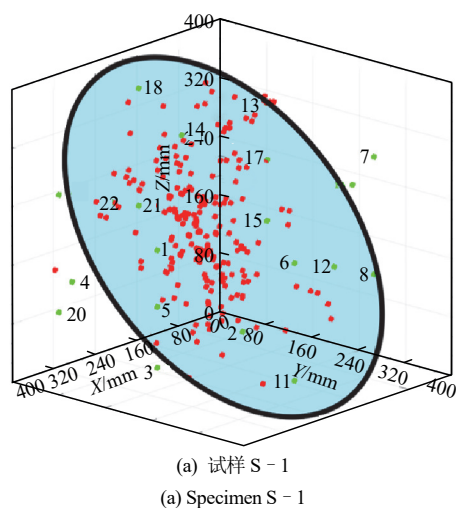


图 12 砂岩水力压裂过程中声发射震源分布

Fig.12 Acoustic emission source distribution during sandstone hydraulic fracturing

方面,在井筒底端附近的主裂缝前缘区域,形成了非常明显的、空间上呈分叉状的“事件簇”。且该“事件簇”沿斜向右上方的打孔面扩展,形成一个与主平面夹角约 60° 的次生椭圆形聚集面。这一复杂的内部事件结构,精准地对应了试样 S-3 表观裂缝的显著特征:在 X1, X2, Y2, Z2 多个面上,新生裂缝不仅沿主方向贯通,更呈现出强烈的放射状与多向沟通特性。这从内部机制上预示了外部即将形成的、沟通多个方向的复杂放射状缝网(见图 6),说明内部事件的复杂化是外部形态复杂化的内在原因。

综上,声发射事件在三维空间内呈现非均匀分布,在最大主应力方向表现出典型的平面状几何构

型, 该聚集面与井筒垂直方向的空间夹角 $\leq 45^\circ$, 揭示出裂隙扩展模式受地应力场影响。同时, 声发射空间定位不仅与表观裂缝相互验证, 更提供了表观观测所无法获得的、关于裂缝动态演化时序和内部损伤萌生的关键信息, 共同构成了对水力压裂裂缝网络形成机制的完整描述。井孔周围的声发射信号分布较为密集, 表明压裂液从井孔注入后有效促进了裂缝的扩展, 同时激活了天然裂缝, 实现了良好的连通性和扩展性。随着压裂液排量的增加, 声发射信号密集度显著升高, 且开始向主裂缝起裂端及分叉区域汇聚, 印证了高排量下裂缝扩展显著、次级裂缝发育增强的现象。此外, 低排量试验中声发射事件分布相对离散, 而高排量条件下事件连续性强, 主裂缝前缘形成明显的“事件簇”迁移模式并形成优势扩展路径。结合压裂曲线分析, 声发射定位结果揭示了不同排量下裂缝起裂特点及裂缝网络复杂度的变化规律, 为致密砂岩储层水力压裂裂缝扩展机制提供了重要试验依据。

4.2 裂缝网络的声发射分形特征

分形理论凭借其处理复杂不规则自然现象的优势, 为相关量化分析提供了数学工具。其中, 分形维数作为核心参数, 能够有效表征如岩体裂缝网络等结构的复杂程度。本研究采用由 P. Grassberger 与 I. Procaccia^[28]提出的 G-P 算法, 计算声发射时间序列的关联维数 D , 以此揭示岩体在损伤破裂过程中的结构复杂特性。具体而言, 本节以真三轴水力压裂试验中采集的声发射振铃计数时间序列为分析对象, 计算步骤如下: 给定振铃计数率序列 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$, 其中 N 为序列总长度, 则有

$$\mathbf{X}_N = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (5)$$

给定声发射振铃计数率时间序列集 N , 首先确定一个 m 维的欧式相空间 R^m (其中嵌入维数 m 满足 $m < N$)。假设延迟时间为 τ , 则在序列中每隔 τ 个数据点截取一次, 每次截取连续 m 个数据点以构成一个 m 维向量 $\mathbf{X}_i$ 。按此方式遍历序列, 最终可得到 $N_m = (N - m + 1)\tau$ 个 m 维相空间的向量 $\mathbf{X}_i$:

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & \dots & x_{1+(m-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & \dots & x_{2+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{Nm-1} & x_{Nm-1+\tau} & \dots & x_{Nm-1} \\ x_{Nm} & x_{Nm+\tau} & \dots & x_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

从 N_m 个点中任选一个点 $\mathbf{X}_i$, 分别计算剩余 $(N_m - 1)$ 个向量点到 $\mathbf{X}_i$ 的距离 r 为

$$r = d(\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j) = \sqrt{\sum_{i=0}^{N_m-1} (x_{i+i\tau} - x_{j+i\tau})^2} \quad (7)$$

式中: $j=1, 2, 3, \dots, m$ 。通过统计相空间中所有相互距离小于给定阈值 r 的向量点对的数量并计算其相对于点对总数的比例, 可得到累积分布积分函数 $C(r)$:

$$C(r) = \lim_{N_m \rightarrow \infty} \frac{1}{N_m} \sum_{i,j=1}^{N_m} H(r - |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j|) \quad (8)$$

其中,

$$H(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $H(x)$ 为 Heaviside 阶跃函数。

$C(r)$ 表征相空间向量的离散程度, 其计算基于有限序列集 N 生成的最大向量数。序列集 N 越大, 所得关联维数 D 越稳定。同时, $C(r)$ 的分布与 r 的取值负相关: r 值减小则 $C(r) \rightarrow 0$, r 值增大则 $C(r) \rightarrow 1$ 。鉴于 $C(r)$ 的这种特性, 为合理确定能明确向量间相关性的 r 取值范围, 需在 $\ln C(r)$ 与 $\ln r$ 的关系图中, 找到一段呈现线性规律的区间, 该区间内存在以下标度关系:

$$\lim_{r \rightarrow 0} C(r) \propto r^{D(m)} \quad (10)$$

式中: $D(m)$ 为相空间分布与重构矢量点分布之间的指数关联因子。为便于识别线性关系, 对式(10)两端进行对数处理, 得到:

$$D(m) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r} \quad (11)$$

上述关系表明, 在标度 r 足够小的范围内, $\ln C(r)$ 与 $\ln r$ 之间存在一段线性良好的区间, 该区间的斜率即可作为嵌入维数为 m 时的关联维数估计值 $D(m)$ 。为获得稳定的关联维数 D , 需通过不断增大嵌入维数 m 并计算相应的 $D(m)$ 来进行拟合。当 $D(m)$ 的值不再随 m 的增加而发生显著变化, 即达到稳定收敛时, 此时对应的 D 值即可视为最优关联维数。

为揭示砂岩压裂水力裂缝破裂尺度的演化规律, 本节通过分形维数(表征损伤自相似性)进行分析。基于 G-P 算法, 利用 Matlab 编程计算了声发射振铃计数率序列的 r 与 $C(r)$ 。图 13(a)显示不同嵌入维数 $m(3 \sim 9)$ 下的 $\ln r - \ln C(r)$ 曲线及对应的分形维数 D 拟合结果。分析表明, D 随 m 线性增大, 并在 $m=6$ 时增量趋于稳定。对 $m=6$ 的进一步验证(见图 13(b)~(d))显示, 三例压裂初始阶段信号的拟合相关系数 R^2 均超过 0.85, 强有力地证明了声发射序列的分形特征。鉴于 $m=6$ 时兼具稳定性与高拟合度, 故将其确定的 D 值用于后续计算分析。

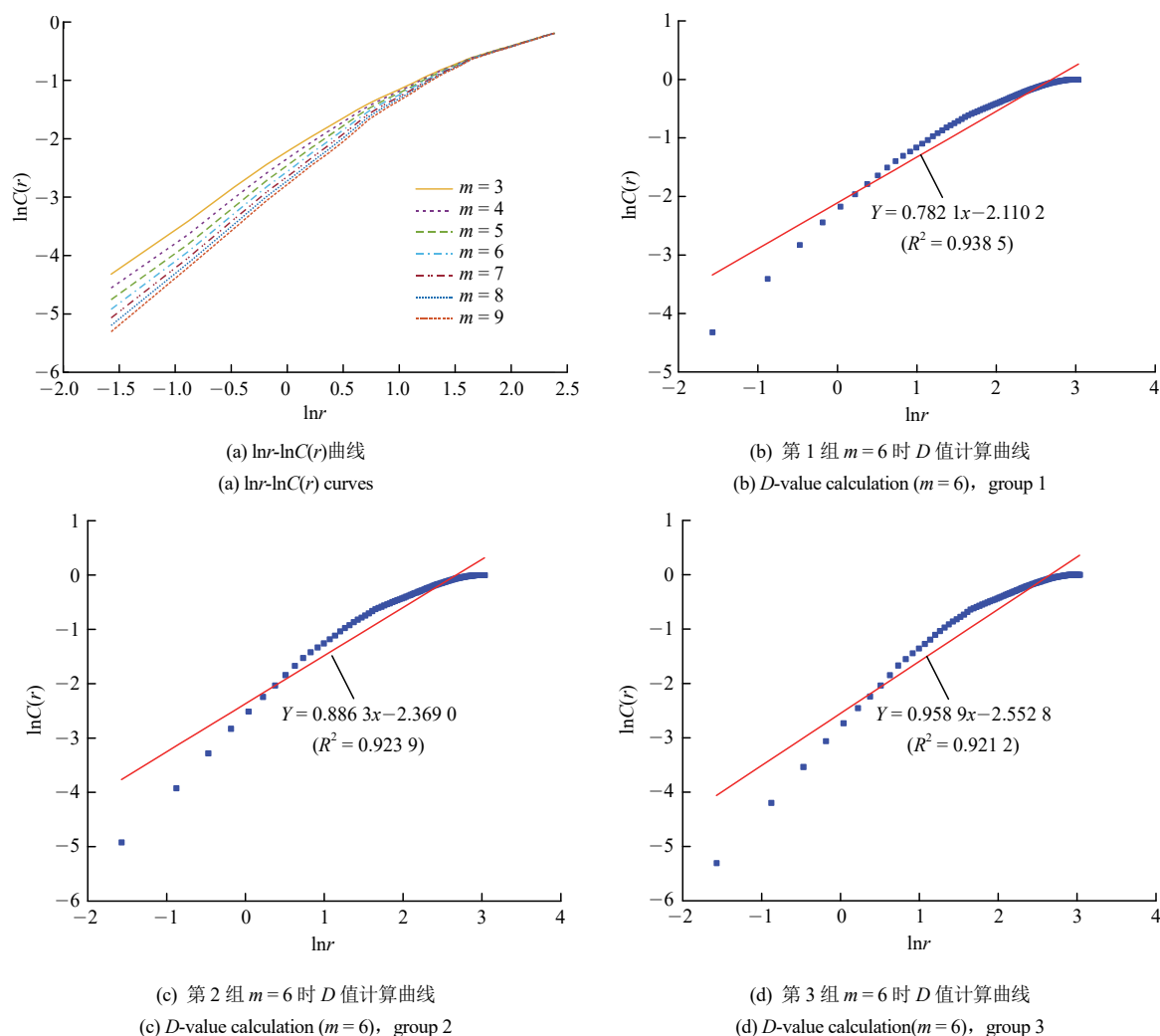


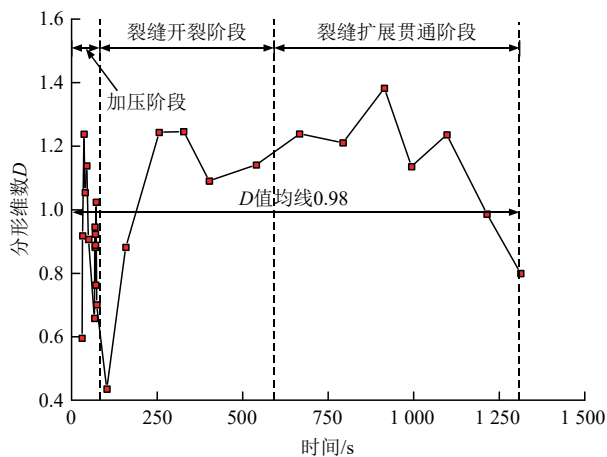
图 13 不同关联维数 m 下 $\ln r$ - $\ln C(r)$ 曲线演化过程与 $m = 6$ 时三例分形维数 D 计算曲线

Fig.13 Evolution of $\ln r$ - $\ln C(r)$ curves under different correlation dimensions m and calculation curves of fractal dimension D for the three cases at $m = 6$

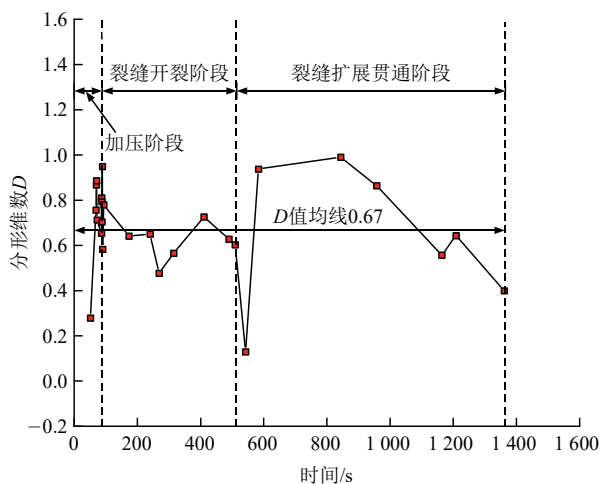
当 D 值增大时, 标志着岩石内部微破裂呈无序分布状态, 反映小尺度破裂不断萌生且随机分布; 反之则标志损伤演化趋向有序模式, 对应局部大尺度破裂定向扩展的现象^[29-30]。图 14 为 3 组砂岩试件在不同注液排量条件下声发射振铃计数率关联维数 D 的时序演化曲线。尽管 3 组试件的分形演化特征存在差异, 但其维数曲线总体上呈现“先下降-后上升-再次波动下降”三阶段演化规律, 在孔压平衡阶段, 分形维数 D 值呈现出分布密集、波动平缓且整体偏高的特征。这一结果表明, 该阶段岩体内部产生的声发射事件较少, 且破裂损伤呈现无序状态、破裂尺度有限。该现象对应着原生裂隙受压闭合与新生裂隙缓慢萌生相互竞争的力学机制, 本质上反映了微观损伤以无序方式逐步累积的过程。

当试验进入起裂阶段, 试件 S-1, S-2 和 S-3

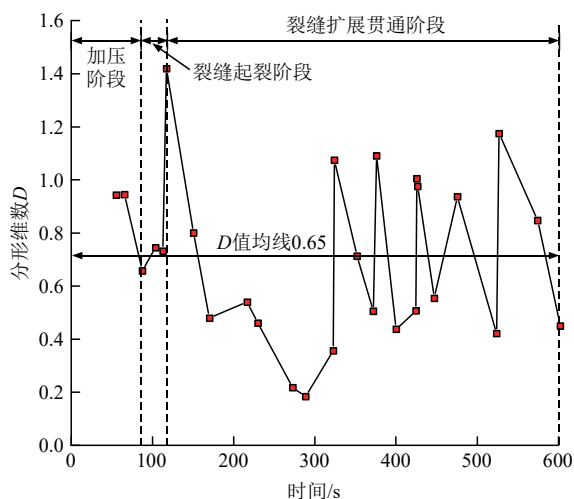
的关联维数 D 均表现出先急剧下降后反弹的变化过程, 最低值分别为 0.44, 0.13 和 0.18, 这揭示了岩石内部微裂隙系统正处于快速萌发与扩展状态。继而, 在裂缝贯通与流动阶段, 3 个试件的分形维数于 0.2~1.4 范围出现显著振荡, 每次振荡峰值均对应着岩石内部大尺度水力裂隙的阶段扩展与相互连接, 同时主导性破裂带的初步形成表明岩石的破裂模式正由无序弥散态向有序聚集态演进。最终, 在压裂完成的瞬间, D 值骤降至各自试验序列的最低点 (0.80(S-1), 0.40(S-2), 0.45(S-3)), 标志着水力微裂缝网络已充分发育并完全贯通, 诱发宏观整体破坏及伴随的巨大能量释放。如图 15 所示, 分形维数与排量的拟合曲线, 随着排量 Q 的增大平均分形维数 D 有明显的线性下降趋势, 说明排量和平均分形维数之间存在较强的负相关关系。



(a) 试样 S-1
(a) Specimen S-1



(b) 试样 S-2
(b) Specimen S-2



(c) 试样 S-3
(c) Specimen S-3

图 14 不同注入排量条件下声发射振铃计数率关联维数 D 的时序演化曲线

Fig.14 Evolution curves of correlation dimension D for AE ringing count rate under different injection rates

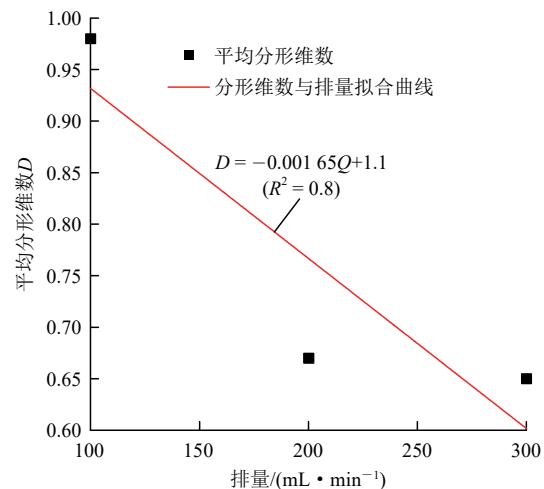


图 15 平均声发射分形维数与排量关系拟合图

Fig.15 Fitting diagram of the relationship between average AE fractal dimension and injection rate

5 讨论

根据 M. D. Zoback 和 D. D. Pollard^[31]的研究, 增加的注入液体速率实际上增加了井筒附近的孔隙压力梯度, 减少了扩展裂缝尖端的压力损失, 这需要进行进一步提高压力来引发破裂^[32]。根据 Terzaghi 有效应力定律, 最大主应力 σ_1 流体入渗可表示为

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - p^* \quad (12)$$

式中: σ'_1 为有效最大主应力, p^* 为流体压力。根据最大主拉应力判据(即 $\sigma'_1 = \sigma_t$, σ_t 为抗拉强度), 可求得裂缝扩展尖端前的断裂过程区半径 r_c :

$$r_c(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma'_1} \right)^2 \left\{ \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right] \right\}^2 \quad (13)$$

式中: φ 为位于断裂过程区边界上的点相对于断裂轴线的极坐标角, K_{IC} 为岩石的断裂韧度值。结合式(12)和(13)可知, 低注入速率下扩大的渗流区域将降低有效应力 σ'_1 和相应增大断裂过程区域, 激活更多剪切微裂纹。注射速率对破裂压力的影响是不同的。这也可以通过 T. Ito 和 K. Hayashi^[33]开发的裂纹模型来验证。如图 16 所示, 根据叠加原理, 井筒的周向总应力 σ_θ 可分为 3 个分量(σ_θ^1 , σ_θ^2 , σ_θ^3), σ_θ^1 的表达式为

$$\sigma_\theta^1 = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) + \frac{a^2}{r^2} \rho_0 \quad (14)$$

式中: ρ_0 为初始孔隙压力, a 为井筒半径。 σ_θ^2 为初始(预加压)引起的应力分量, 由孔隙压力 p_0 和井筒压力 p^* , 可表示为

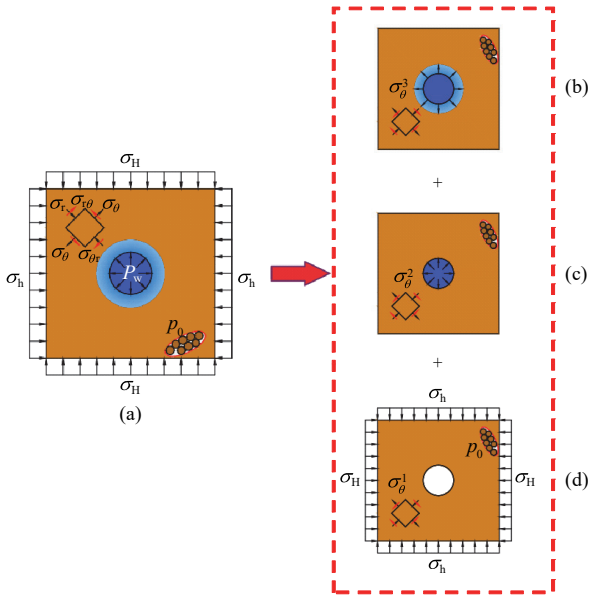


图16 水力压裂试验中井筒壁近场应力的示意图模型及其由各应力场分量可能产生的叠加效应

Fig.16 Schematic model of the near-field stress at the borehole wall in a hydraulic fracturing experiment and its potential superposition by individual stress field components

$$\sigma_\theta^2 = \frac{a^2}{r^2} (p_w - p_0) \quad (15)$$

式中: p_w 为注入压力。其中 σ_θ^3 为由于压力差导致流体从井筒渗透到地层中的应力分量, 可表示为

$$\sigma_\theta^3 = A \left\{ \frac{1}{r^2} \int_a^r (p - p_0) p dp - (p - p_0) \right\} \quad (16)$$

式中: A 为与岩石体积模量相关的因子; p 为恒定加压速率下井筒加压引起的孔隙压力分布, 由下式可计算:

$$p = C \int_0^T f(r, s) ds + p_0 \quad (17)$$

式中: T 为井筒加压时间, C 为与注入速率正相关的加载速率(也可称为加压速率)。假设孔隙压力与加压速率线性相关, 可将式(17)转化为

$$p = CT + p_0 \quad (18)$$

根据最大拉应力原理, 可以得到

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_\theta^1 + \sigma_\theta^2 + \sigma_\theta^3 + p' = \sigma_t \quad (19)$$

将式(18)代入式(17), 并结合式(14)~(19)得出井筒压力表达式 P_w :

$$P_w = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(\frac{r^2}{a^2} + 3 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{r^2}{a^2} \right) + \frac{r^2}{a^2} \sigma_t - \frac{r^2}{a^2} p' + A \frac{r^2 + a^2}{2a^2} CT = M_{\text{stress}} + M_{\text{strength}} - \frac{r^2}{a^2} p' + A \frac{r^2 + a^2}{2a^2} CT \quad (20)$$

对于固定的远场应力和同类型岩石, 前两项 M_{stress} 和 M_{strength} 为常数项, $\frac{r^2}{a^2}$ 与孔隙压力相关, 而 $A \frac{r^2 + a^2}{2a^2} CT$ 则与注入速率相关。对于 $\frac{r^2}{a^2} p'$, 其中井筒半径 a 与渗透半径 r 为定值, 即拉伸时破坏的孔隙压力 p' 越大, 井筒压力越小, 呈负相关。对于 $A \frac{r^2 + a^2}{2a^2} CT$, 其中井筒半径 a 、渗透半径 r 以及岩石体积模量相关的因子 A 皆为定值。需特别指出的是, 在实验室尺度试验中通常忽略井筒及管道内压裂液的流动摩擦阻力, 因此注射泵记录的注入压力, 可直接视为井筒压力。

根据式(20), 当注水速率 C 处于较低水平时, 流体渗入效应增强, 导致孔隙压力升高, 从而降低破裂压力。反之, 当注水速率 C 较高时, 注水速率的提升与流体渗入的减少共同作用, 促使破裂压力增大。本试验研究结果表明: 在 100 mL/min 的低注水速率条件下, 流体渗入量较大, 孔隙压力较高, 此时总排量(CT)为 2 250 mL, 测得破裂压力为 68 MPa; 当注水速率提升至 200 mL/min 时, 注水速率的增加导致流体渗入量减少, 孔隙压力降低, 总排量增至 4 537 mL, 破裂压力相应升高至 86 MPa; 而当注水速率进一步提高至 300 mL/min 时, 流体渗入量和孔隙压力进一步降低, 由于高注水速率显著缩短了水压致裂时间, 总排量下降至 2 375 mL。尽管该条件下的总排量较 200 mL/min 工况有所降低, 但由于注水速率与流体渗入的竞争效应, $\frac{r^2}{a^2} p'$ 起主导作用, 最终破裂压力继续增大至 100 MPa。由此可见, 水压致裂过程中的破裂压力受注水速率与流体渗入竞争效应的共同调控, 然而二者之间的竞争机制及其主导速率的临界条件仍需进一步深入研究。

6 结论与展望

本研究以四川普光地区致密砂岩为研究对象, 开展了边长 400 mm 立方体试样的大尺度真三轴水力压裂试验, 揭示了水力裂缝网络演化的排量作用机制, 得出以下主要结论:

(1) 随着排量从 100 mL/min 增加至 300 mL/min, 水力裂缝增长率由 19.95% 提升至 67.01%, 分形维数由 1.102 2 增加至 1.267 5, 裂缝扩展方向由单一优势方向演化为放射状多方向, 说明提高排量可以促进裂缝延伸与分支发育, 有效沟通新生裂缝和天然裂缝,

且该效应不受初始裂缝差异的影响。

(2) 注入排量增加导致最大井孔压力由 68 MPa 增大至 86 MPa, 最后增大至 100 MPa; 声发射累计释放能量由 285.69×10^3 aJ 增大至 $1\,471.57 \times 10^3$ aJ, 最后增大至 $1\,560.97 \times 10^3$ aJ。说明从低排量提升至较高排量时(100~200 mL/min), 能量增大效应显著(增幅 415.1%), 排量的提高增强了裂缝尖端能量积累与释放, 促进了更大范围的岩石破裂。进一步提升排量时(200~300 mL/min), 能量增长趋缓(增幅 6.1%), 反映能量释放存在饱和效应。

(3) 破裂事件的空间分布特征表现为显著的平面状聚集, 其优势方向与最大水平主应力方向高度一致, 高排量下形成集中于主裂缝前缘的“事件簇”, 证实次级裂缝发育程度增强。声发射振铃计数的时序曲线揭示了水力裂缝破裂演化呈现“下降-上升-波动下降”三阶段特征, 最低值达 0.13, 最高值达 1.4, 完整刻画了裂缝从无序萌生、有序贯通至宏观破裂形成的损伤演化全过程。

(4) 理论分析结果表明, 破裂压力受注入速率和流体入渗共同耦合调控, 低排量时流体渗入主导, 破裂压力随之降低, 更易诱发剪切滑移, 进而形成形态相对简单的裂缝; 高排量时注入速率主导作用增强, 破裂压力升高, 高速率流体在裂缝尖端产生更强的拉张应力集中, 更利于产生复杂缝网。试验证实破裂压力随排量递增, 排量增至 300 mL/min 时虽总液量降低, 但高注入速率仍使破裂压力进一步增大, 体现二者竞争机制是调控裂缝起裂和扩展的关键因素, 但其临界转换条件仍需深入研究。

(5) 川东北致密砂岩的力学脆性整体评价较好, 水力压裂实质是一个流固耦合的破裂过程, 在实际地应力差条件下, 排量为 200~300 mL/min(对应现场施工排量应为 13.5~20.25 m³/min), 可以得到最优的压裂效果, 同时建立的大尺度试验方法体系为后续储层改造研究提供了可靠技术支撑。

此外, 本文只考虑了排量对致密砂岩水压致裂缝网演化的影响, 后续还可在现有排量研究基础上, 系统开展地应力差、天然裂缝产状(倾角、密度、充填性)、压裂液性质(黏度、类型)及注入程序(段塞式、变排量)等多因素协同作用下的大尺度真三轴压裂试验。重点揭示这些因素如何与排量交互作用, 共同调控裂缝起裂、扩展路径与缝网最终形态, 建立更完善的“地质-工程”参数匹配图版。

参考文献(References):

- [1] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 854 - 2 858.(HE Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 854 - 2 858.(in Chinese))
- [2] 汤继周, 张卓, 张丰收, 等. 陆相页岩储层水平井无限级压裂工艺优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2 096 - 2 108.(TANG Jizhou, ZHANG Zhuo, ZHANG Fengshou, et al. Optimization of unlimited stage fracturing technology for horizontal wells in continental shale formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2 096 - 2 108.(in Chinese))
- [3] 冯宏波. 致密砂岩气田体积压裂及简易测试求产技术的探究与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(15): 187 - 189.(FENG Hongbo. Exploration and application of volume fracturing and simplified production testing technology in tight sandstone gas fields[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2025, 45(15): 187 - 189.(in Chinese))
- [4] 屈小磊, 赫建明, 陈杰, 等. 页岩水力压裂微裂纹扩展演化试验研究及力学机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增1): 3 151 - 3 159.(QU Xiaolei, HE Jianming, CHEN Jie, et al. Experimental study on micro-crack propagation and mechanical mechanism analysis of hydraulic fracturing in shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Supp.1): 3 151 - 3 159.(in Chinese))
- [5] 陈勉. 页岩气储层水力裂缝转向扩展机制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(5): 88 - 94.(CHEN Mian. Re-orientation and propagation of hydraulic fracture s in shale gas reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science, 2013, 37(5): 88 - 94.(in Chinese))
- [6] GUO TK, WANG HY, CHEN M, et al. Numerical simulation of fracture propagation in deflagration-hydraulic composite fracturing of unconventional reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(4): 1 017 - 1 028.
- [7] 侯冰, 张其星, 陈勉. 页岩储层压裂物理模拟技术进展及发展趋势[J]. 石油勘探技术, 2023, 51(5): 66 - 77.(HOU Bing, ZHANG Qixing, CHEN Mian. Status and tendency of physical simulation technology for hydraulic fracturing of shale reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(5): 66 - 77.(in Chinese))
- [8] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 52 - 59.(GUO Yintong, YANG Chunhe, JIA Changgui, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 52 - 59.(in Chinese))
- [9] 魏元龙, 杨春和, 郭印同, 等. 须家河组致密砂岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增1): 2 720 - 2 731.(WEI Yuanlong, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Experimental study on hydraulic fracture geometry of tight sandstone from Xujiache group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.1): 2 720 - 2 731.(in Chinese))
- [10] 曾义金, 周俊, 王海涛, 等. 深层页岩真三轴变排量水力压裂物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1 758 - 1 766.(ZENG Yijin, ZHOU Jun, WANG Haitao, et al. Research on true triaxial hydraulic fracturing in deep shale with varying pumping rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1 758 - 1 766.(in Chinese))
- [11] 杜涛涛, 鞠文君, 卢志国, 等. 岩石水力压裂力学特性劣化实验研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 74 - 83.(DU Taotao, JU Wenjun, LU Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical properties of rock degraded by hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2025,

- 53(10): 74–83.(in Chinese))
- [12] 陈瑞杰,熊志文,王 瑞,等.煤层顶板水力压裂裂缝扩展规律实验研究[J].中国矿业,2024,33(12):208–216.(CHEN Ruijie, XIONG Zhiwen, WANG Rui, et al. Experimental study on the expansion law of hydraulic fracturing cracks in coal seam roof[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(12): 208–216.(in Chinese))
- [13] 崔俊艳,姚亚辉,李胜涛,等.水力压裂条件下花岗岩裂缝扩展行为与声发射特性[J].科学技术与工程,2025,25(28):11921–11931.(CUI Junyan, YAO Yahui, LI Shengtao, et al. Fracture expansion behavior and acoustic Emission characteristics of granite under hydraulic fracturing conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(28): 11921–11931.(in Chinese))
- [14] 侯振坤,杨春和,王 磊,等.大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J].岩土力学,2016,37(2):407–414.(HOU Zhenkun, YANG Chunhe, WANG Lei, et al. Hydraulic fracture propagation of shale horizontal well by large-scale true triaxial physical simulation test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 407–414.(in Chinese))
- [15] 吴福元,李献华,郑永飞,等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J].岩石学报,2007,32(2):185–220.(WU Fuyuan, LI Xianhua, ZENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 32(2): 185–220.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. NB/T 10248—2019 页岩脆性指数测定及评价方法[S]. [S. l.]: [s. n.], 2019.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. NB/T 10248—2019 Determination and evaluation method of shale brittleness index[S]. [S. l.]: [s. n.], 2019.(in Chinese))
- [17] 李庆辉,陈 勉,金 衍,等.页岩脆性的室内评价方法及改进[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1680–1685.(LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680–1685.(in Chinese))
- [18] 石美璟.岩相约束的页岩脆性指数预测方法研究[J].能源技术与管理,2025,50(4):29–32.(SHI Meijing. Study on a lithofacies-constrained prediction method for shale brittleness index[J]. Energy Technology and Management, 2025, 50(4): 29–32.(in Chinese))
- [19] 秦晓艳,王震亮,于红岩,等.基于岩石物理与矿物组成的页岩脆性评价新方法[J].天然气地球科学,2016,27(10):1924–1932.(QIN Xiaoyan, WANG Zhenliang, YU Hongyan, et al. A new shale brittleness evaluation method based on rock physics and mineral compositions[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(10): 1924–1932.(in Chinese))
- [20] 张 乐,党发宁,丁卫华,等.基于改进差分盒维数法的混凝土细观损伤定量研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(4):973–985.(ZHANG Le, DANG Faning, DING Weihua, et al. Quantitative study on meso-damage of concrete based on improved differential box-counting method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4): 973–985.(in Chinese))
- [21] 刘 晟,王卫星,曹 霆,等.基于差分计盒维数及最大熵阈值的裂缝提取[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(5):13–21.(LIU Sheng, WANG Weixing, CAO Ting, et al. Road crack extraction based on differential box dimension and maximum entropy threshold[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2015, 35(5): 13–21.(in Chinese))
- [22] 李克玺,党建东,张 见,等.基于声发射特征参数的不同类型砂岩破裂特征研究[J].现代隧道技术,2025,62(4):26–36.(LI Kexi, DANG Jiandong, ZHANG Jian, et al. Study on fracture characteristics of different types of sandstone based on acoustic emission characteristic parameters[J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(4): 26–36.(in Chinese))
- [23] 薛瑞雄,孔颖慧,冯金翔.基于声发射不同岩石破裂特征及失稳前兆信息研究[J].煤炭技术,2024,43(12):13–19.(XUE Ruixiong, KONG Yinghui, FENG Jinxiang. Research on different rock fracture characteristics and instability precursor information based on acoustic emission[J]. Coal Technology, 2024, 43(12): 13–19.(in Chinese))
- [24] 赵兴东,刘建坡,李元辉,等.岩石声发射定位技术及其实验验证[J].岩土工程学报,2008,30(10):1472–1476.(ZHAO Xingdong, LIU Jianpo, LI Yuanhui, et al. Experimental verification of rock locating technique with acoustic emission [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1472–1476.(in Chinese))
- [25] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫,等.基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):944–950.(ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruifu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 944–950.(in Chinese))
- [26] 马军强,李学华,张佳琦,等.煤系岩层真三轴水力压裂裂缝扩展规律研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(4):32–57.(MA Junqiang, LI Xuehua, ZHANG Jiaqi, et al. The study on the propagation laws of hydraulic fractures in coal measure strata under true triaxial conditions[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(4): 32–57.(in Chinese))
- [27] 许 丹,胡瑞林,高 玮,等.页岩层纹结构对水力裂缝扩展规律的影响[J].石油勘探与开发,2015,42(4):523–528.(XU Dan, HU Ruilin, GAO Wei, et al. Effects of laminated structure on hydraulic fracture propagation in shale[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 523–528.(in Chinese))
- [28] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal[J]. Physical Review A, 1983, 28(4): 2591.
- [29] 祁 浩,李春晓,李长祺.基于多重分形理论的花岗岩岩爆试验声发射信号特征研究[J].采矿与安全工程学报,2024,41(5):934–945.(QI Hao, LI Chunxiao, LI Changqi. Study on the characteristics of acoustic emission signals of granite under rockburst based on multifractal theory[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2024, 41(5): 934–945.(in Chinese))
- [30] 姜永东,谢成龙,宋 晓,等.真三轴下砂岩水力压裂物理模拟与声发射特征[J].地下空间与工程学报,2024,20(4):1145–1151.(JIANG Yongdong, XIE Chenglong, SONG Xiao, et al. Physical simulation and acoustic emission characteristics of sandstone hydraulic fracturing under true triaxial[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(4): 1145–1151.(in Chinese))
- [31] ZOBACK M D, POLLARD D D. Hydraulic fracture propagation and the interpretation of pressure-time records for in-situ stress determinations[C]// Proceedings of the 19th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Reno, Nevada: [s. n.], 1978: ARMA–78–0014.
- [32] ZHANG Y F, ZHAO Y, ZANG A, et al. Acoustic emission evolution and hydraulic fracture morphology of Changning shale stressed to failure at different injection rates in the laboratory[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 57(2): 1287–1308.
- [33] ITO T, HAYASHI K. Physical background to the breakdown pressure in hydraulic fracturing tectonic stress measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1991, 28(4): 285–293.