



## 岩石水力压裂力学特性劣化试验研究

杜涛涛 鞠文君 卢志国 潘俊锋 夏永学 闫瑞兵

### 引用本文:

杜涛涛, 鞠文君, 卢志国, 等. 岩石水力压裂力学特性劣化试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 74–83.

DU Taotao, JU Wenjun, LU Zhiguo. Experimental study on mechanical properties of rock degraded by hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 74–83.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1345>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 纵向切槽水力压裂裂缝偏转规律研究

Numerical study on law of fracture deflection in longitudinal slot hydraulic fracturing

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 78–84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1e4b9182-5600-4023-b0aa-c8b955510477>

#### 天然裂缝对水力压裂煤的起裂及扩展试验研究

Study on influence of natural fractures on initiation and propagation of hydraulic fracturing coal

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 92–101 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0813>

#### 采空区下伏煤层水力压裂试验研究与应用

Experimental study and application of hydraulic fracturing in underlying coal seam

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 231–242 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0286>

#### 水力压裂煤体复电阻率频散特征试验研究

Experimental study on dispersion characteristics of complex resistivity of hydraulic fracturing coal

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 198–202 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c86f8baa-c422-4484-9f10-270fea2ef474>

#### 高煤阶煤样水力压裂前后应力渗透率试验研究

Experimental study on stress-permeability of high rank coal samples before and after hydraulic fracturing

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 353–360 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1789>

#### 水力压裂-深孔预裂爆破复合增透技术研究

Study on hydraulic fracturing-deep hole pre-splitting blasting composite permeability enhancement technology

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e5c672f8-9e94-41d6-984d-c4ea8f766a54>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杜涛涛, 鞠文君, 卢志国, 等. 岩石水力压裂力学特性劣化试验研究[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.

## 岩石水力压裂力学特性劣化试验研究

杜涛涛<sup>1,2,3</sup>, 鞠文君<sup>1,2</sup>, 卢志国<sup>1,2</sup>, 潘俊锋<sup>1,2,3</sup>, 夏永学<sup>1,2,3</sup>, 闫瑞兵<sup>4</sup>

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 3. 煤矿灾害防控全国重点实验室 冲击地压室, 北京 100013; 4. 国家能源集团 新疆能源化工有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830027)

**摘要:** 岩石水力压裂力学性质劣化程度准确测定是水力压裂卸压机理揭示和压裂效果评估的基础, 为揭示岩石水力压裂力学特性劣化规律, 分别设计了真三轴水力压裂物模试验和岩石力学测试试验 2 个阶段方案, 利用 CT 扫描重构裂缝三维形态, 通过真三轴水力压裂物模试验, 制备含水力压裂裂缝的岩石试件; 对制备的含水力压裂裂缝的岩石试件开展了岩石力学性质单轴、三轴压缩试验和巴西劈裂试验。结果表明: 刻槽能够有效降低裂缝破裂压力, 增大槽的宽度, 有利于提高裂缝起裂概率, 但槽间距太小, 裂缝易合并; 压裂液黏度越高, 泵注压力起压越快, 裂缝破裂压力越高; 排量越低, 液体滤失所占比例越大, 裂缝破裂压力越小, 排量升高后, 裂缝起裂压力显著增大, 起裂所需时间越短。水力压裂后, 岩石内摩擦角、黏聚力、抗拉强度的折减系数分别为 0.896、0.996、0.295; 得到了弹性模量折减系数关系式, 随围压增大, 2 种试样弹性模量均呈增大趋势, 且增长速率逐渐减缓, 而折减系数随围压增大呈降低趋势, 但降低速率减缓; 试样抗拉强度压裂后降幅为 70.49%, 降低量达压裂后试样的 2.39 倍, 试样抗拉强度显著降低, 表明压裂使试样内部产生裂隙, 发生损伤, 压裂前后标准差增大 1.87 倍, 表明压裂过程使试样内部产生大量非均匀分布裂隙, 微裂隙数量及分布特征存在较大差异, 造成试样力学性能差异较大。

**关键词:** 水力压裂; 压裂裂缝; 力学特性; 劣化规律; 折减系数

**中图分类号:** TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)10-0074-10

### Experimental study on mechanical properties of rock degraded by hydraulic fracturing

DU Taotao<sup>1,2,3</sup>, JU Wenjun<sup>1,2</sup>, LU Zhiguo<sup>1,2</sup>, PAN Junfeng<sup>1,2,3</sup>, XIA Yongxue<sup>1,2,3</sup>, YAN Ruibing<sup>4</sup>

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Rock Burst Sub Laboratory, State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Prevention and Control, Beijing 100013, China; 4. Xinjiang Energy and Chemical Industry Co., Ltd., CHN Energy, Urumqi 830027, China)

**Abstract:** The accurate determination of the degree of mechanical property degradation of rock layers after hydraulic fracturing is the basis for revealing the pressure relief mechanism of hydraulic fracturing and evaluating the fracturing effect. To reveal the degradation law of rock hydraulic fracturing mechanical properties, a two-stage scheme of true triaxial hydraulic fracturing physical model experiment and rock mechanics testing experiment was designed separately. In order to study the degradation law of mechanical properties of rock layers before and after hydraulic fracturing, a two-stage plan of true triaxial hydraulic fracturing physical model experiment and rock mechanics testing experiment was designed. CT scanning was used to reconstruct the three-dimensional morphology of fractures. Through true triaxial hydraulic fracturing physical model experiment, rock specimens containing hydraulic fracturing fractures were prepared; Uniaxial and triaxial compression tests, as well as Brazilian splitting tests, were conducted on rock specimens containing hydraulic fracturing fractures. The research results indicate that grooving can effectively reduce the pressure of crack rupture, increase the width of the groove, and im-

收稿日期: 2024-09-20 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.12438/cst.2024-1345

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004604); 国家自然科学基金资助项目(52474102); 新疆自治区天池人才基金资助项目

作者简介: 杜涛涛(1984—), 男, 山东枣庄人, 研究员, 博士。E-mail: [yl\\_dutt@126.com](mailto:yl_dutt@126.com)

prove the probability of crack initiation. However, if the groove spacing is too small, cracks are prone to merge; The higher the viscosity of the fracturing fluid, the faster the pumping pressure rises, and the higher the fracture pressure; The lower the displacement, the greater the proportion of liquid filtration, and the lower the crack rupture pressure. After the displacement increases, the crack initiation pressure significantly increases, and the time required for initiation is shorter. After hydraulic fracturing, the reduction coefficients of internal friction angle, cohesion, and tensile strength of the rock are 0.896, 0.996, and 0.295, respectively; The relationship between the reduction coefficient of elastic modulus was obtained. With the increase of confining pressure, the elastic modulus of both samples showed an increasing trend, and the growth rate gradually slowed down. However, the reduction coefficient showed a decreasing trend with the increase of confining pressure, but the rate of decrease slowed down; The tensile strength of the sample decreased by 70.49% after fracturing, which was 2.39 times that of the sample after fracturing. The significant decrease in tensile strength of the sample indicates that fracturing causes cracks and damage inside the sample. The standard deviation before and after fracturing increased by 1.87 times, indicating that the fracturing process generates a large number of unevenly distributed cracks inside the sample, and there are significant differences in the number and distribution characteristics of micro cracks, resulting in significant mechanical differences in the sample.

**Key words:** hydraulic fracturing; fracturing cracks; mechanical properties; degradation law; reduction factor

## 0 引言

1935 年, GREBE 等<sup>[1]</sup>首次发现高速-高压流体能够诱导岩石产生裂缝, 水力压裂技术自此诞生; 1947 年, 在美国堪萨斯州首次将水力压裂技术应用于油气井<sup>[2]</sup>开发; 1949 年, 水力压裂技术应用于石油商业<sup>[3]</sup>开发; 1954 年, 美国阿拉巴马州将水力压裂技术应用于煤层气<sup>[4]</sup>开采; 1965 年, 我国将水力压裂技术成功地应用于煤层气开采试验。

目前, 水力压裂技术因其安全性高、机动性强、可操作性大, 在煤矿领域防治冲击地压、矿震中得到广泛应用, 窦林名等<sup>[5]</sup>研究了煤矿矿震类型及震动传播规律, 高明仕等<sup>[6]</sup>分析了厚硬顶板冲击矿震影响的远近场效应, 曹安业等<sup>[7]</sup>、白贤栖等<sup>[8]</sup>研究了矿震发生机制及治理现状, 地面压裂技术被东滩煤矿应用于控制矿震<sup>[9]</sup>、被塔山煤矿应用于控制强矿压<sup>[10]</sup>、被彬长矿区应用于控制冲击地压<sup>[11]</sup>。在油气领域, 更多关注裂缝的起裂与扩展规律, 很少关注压裂后力学性质的变化, 在裂缝扩展方面, 典型的有 KGD<sup>[12]</sup>、PKN<sup>[13]</sup>二维模型; ADVANI 等<sup>[14]</sup>、BOUTECA<sup>[15]</sup>建立了能够反映三维扩展状态的准三维模型。评估石油、页岩气压裂效果的重要指标是产量, 压裂是增产的重要手段。而煤矿厚硬顶板冲击地压、矿震等防治则更多关注水力压裂产生的裂缝是否能够降低坚硬顶板的完整性, 在采动应力作用下, 裂缝是否能够有效发育扩展, 并降低顶板破断能量强度和煤体应力集中, 从而达到对坚硬顶板的控制防冲目标。于斌等<sup>[16]</sup>针对我国大同矿区坚硬难垮顶板的控制, 率先采用水力压裂的方法对坚硬顶板进行控制, 使得顶板内萌生大量裂隙, 降低了坚硬顶板的整体性和几何尺寸, 明显缩短了坚硬顶板的垮落步距; 冯彦军等<sup>[17]</sup>研究发现分段逐级压裂可有

效增加岩层裂缝, 提高顶板的弱化效果; 蔡峰等<sup>[18]</sup>采用水力压裂技术对巷道上覆两侧坚硬顶板进行切顶卸压, 实施压裂后的巷道变形量减少了 40%。

压裂后的岩层力学性质是评估压裂效果的重要指标。多采用岩石材料或者类岩材料作为研究对象, 以人为预制裂缝的方式, 研究含裂隙煤岩体的力学性质。刘江伟等<sup>[19]</sup>采用线锯切割的方法开展了含不同长度和角度预制裂缝煤样的巴西劈裂试验研究, 揭示人工裂缝对煤的抗拉性能及能量积聚耗散的弱化规律; 刘新荣等<sup>[20-21]</sup>分析了试件的应力-应变曲线、强度与变形特性、裂纹演化与破坏模式及能量耗散特征, 裂隙试件的应力-应变曲线进入裂纹萌生与扩展阶段早于完整试件, 裂隙试件的峰值应力、弹性模量和峰值应变均有明显减小, 裂隙的存在能够完全改变岩体试件的破坏模式; 朱志洁等<sup>[22]</sup>对含预制裂隙试件开展单轴压缩试验, 结果表明, 同种类型预制裂隙试件的破坏形式, 随倾角的增加, 破坏类型呈拉破坏—拉剪破坏—拉破坏—劈裂拉破坏的变化趋势, 破坏剧烈程度呈现强—弱—强的变化趋势; 平行双裂隙的试件产生的次生裂隙与预制裂隙形成块体结构, 削弱了试件整体的完整性。

区域压裂后岩层现场取样十分困难, 因此以人为预制裂缝的方式研究含裂隙煤岩体的力学性质, 是一种比较有效的研究方法, 但与水力压裂产生的裂缝仍具有一定差异, 水力压裂造缝不仅具有随机性, 而且裂缝的缝长、缝宽和缝高与预制裂缝具有显著的不同。为更有效接近工程实践中的压裂后岩层力学性质的变化, 先通过三轴水力压裂试验实现压裂裂缝, 然后在产生水力压裂裂缝的试样上进一步取心并加工试件, 开展压裂后的力学特性试验研究, 最终揭示水力压裂后岩石力学特性劣化规律, 为评估压裂效果和揭示水力压裂岩层控制机理等研究提

供借鉴。

1 岩石水力压裂力学特性劣化试验

1.1 试件制备

1) 水力压裂试件制备。本次试验所用岩样均取自于孟村煤矿, 为保证岩样性质一致, 减少岩样本身对试验结果的影响, 所有岩样均在同一位置取样。

将岩样加工成尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件, 在试件中心钻取内径 16 mm、深度 80 mm 的孔模拟压裂井眼(图 1), 加工外径 14 mm、内径 10 mm、长度 80 mm 金属圆管模拟压裂井筒, 井筒与井眼之间采用环氧树脂胶进行黏接, 确保压裂试验过程中井筒的稳定以及注液管线与井筒的密封效果。

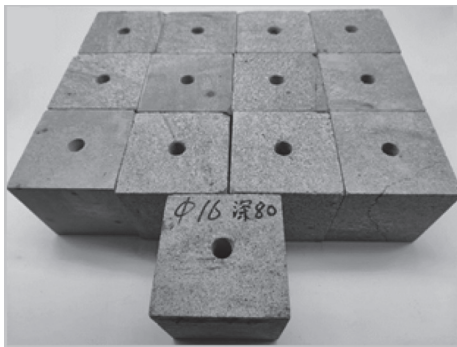


图 1 水力压裂试样制备  
Fig.1 Preparation of standard rock samples

2) 岩石力学试件制备。为探究水力压裂裂缝对顶板岩层力学特性的影响, 利用 CT 扫描真三轴水力压裂试验后试件中裂缝的形态与位置, 根据裂缝形态分布与位置, 钻取长 5 cm、直径 2.5 cm 的圆柱体试样, 制备含水力压裂裂缝的试件, 为进行试验对比, 对未压裂岩块进行取心和试件制备, 获得不含水力裂缝的试件, 图 2 为部分制备试件, 并进行了试件标记。

1.2 试验设备

如图 3 所示, 真三轴水力压裂室内试验装置包括以下几个部分: 给岩心加载三向应力的围压控制器和围压泵、放置岩心的三轴围压框架、用于泵注压裂液体系的 ISCO 泵、预置压裂液体系的中间容器、监测记录泵注曲线的数据监控设备和一个模拟地层温度的加热系统。

真三轴水力压裂系统实物如图 4 所示, 其中, 围压泵可施加的最大三轴应力为 30 MPa, 精度为 0.1 MPa; ISCO 泵最大注入压力为 70 MPa、最大泵注排量为 204 mL/min。

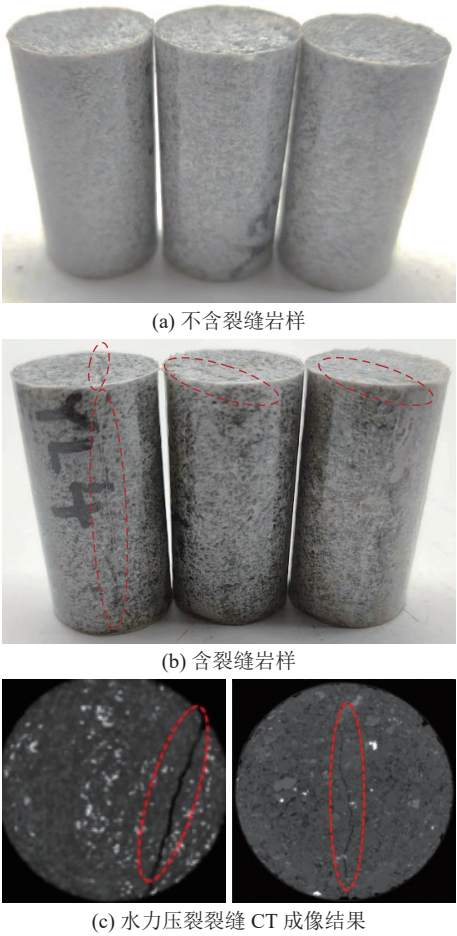


图 2 岩石力学试样制备  
Fig.2 Preparation of rock mechanics samples

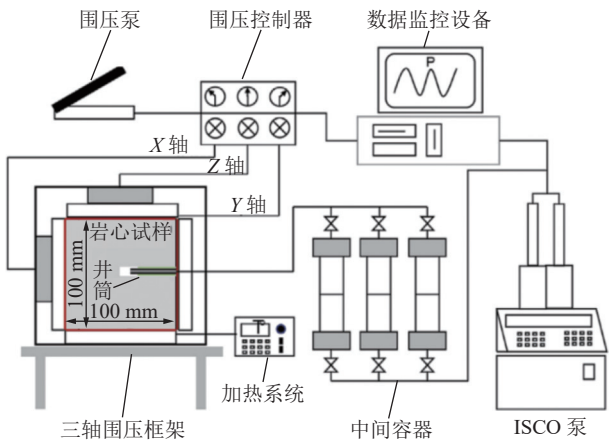


图 3 三轴水力压裂系统原理  
Fig.3 Schematic of the triaxial hydraulic fracturing system

如图 5 所示, 采用 Brivo CT385 扫描仪对岩石试样进行压裂后的内部裂缝形态观察。该扫描仪主要包括  $\gamma$  射线源、探测器、扫描仪框架和成像系统。该扫描仪的最大输出功率为 28 kW, 最大扫描电压为 140 kV, 最大扫描电流为 200 mA。单位像素尺寸为 190 mm×190 mm, 单层扫描厚度为 0.625 mm。立方

体样品放置在 CT 框架的中间,用  $\gamma$  射线 CT 从一边到另一边进行扫描,基于 CT 扫描数据重建三维断层间裂缝。



图 4 三轴水力压裂系统实物

Fig.4 Physical picture of triaxial hydraulic fracturing system

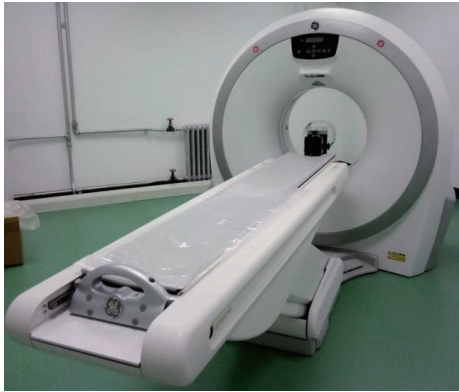


图 5  $\gamma$  射线计算机断层扫描系统

Fig.5 Gamma ray computed tomography system

1.3 试验方案

分为 2 个阶段试验研究压裂后岩层的力学性质劣化程度,第 1 阶段通过真三轴水力压裂物模试验实现水力压裂造缝,为第 2 阶段开展岩石力学试验提供试件制备条件,第 2 阶段开展力学特性劣化试验。

1) 真三轴水力压裂物模试验方案。分别设计不同槽间距、压裂液和排量 3 个因素条件下试验方案,见表 1—表 3,实现水力压裂造缝。

不同切槽水力压裂试验方案。试验中,环形槽深度为 3 mm,环形槽距离为 10、15、20 mm,环形槽数量为 0、1、2 和 3。KC-0 表示未刻槽,作为对照试验;KC-1 表示单向、双向组合刻槽,槽间距 10 mm;KC-2 表示双向、单向刻槽,槽间距 20 mm;KC-3 表示 2 个环形槽且加大槽宽,槽间距 15 mm;KC-4 表示 2 个环形槽,槽间距 30 mm;KC-5 表示 3 个环形槽,槽间距 10 mm;KC-6 表示 3 个环形槽,槽间距 15 mm,具体试验参数见表 1,试验设计的应力组合为垂直主应力 9.0 MPa,最大水平主应力 7.9 MPa,最

表 1 不同切槽水力压裂试验方案

Table 1 Experimental scheme of hydraulic fracturing with different cluster spacing

编号	槽间距/mm	切槽方案	压裂液黏度/(mPa·s)	泵注排量/(mL·min <sup>-1</sup> )
Y3	0	KC-0	100	15
a	10	KC-1	100	15
b	20	KC-2	100	15
c	15	KC-3	100	15
d	30	KC-4	100	15
e	10	KC-5	100	15
f	15	KC-6	100	15

表 2 不同压裂液水力压裂试验方案

Table 2 Experimental scheme of hydraulic fracturing with different fracturing fluids

编号	射孔方式	压裂液黏度/(mPa·s)	泵注排量/(mL·min <sup>-1</sup> )
Y1	裸眼压裂	1	15
Y2	裸眼压裂	5	15
Y3	裸眼压裂	30	15
Y4	裸眼压裂	100	15

表 3 不同排量下水力压裂试验方案

Table 3 Experimental scheme of hydraulic fracturing with different injection rates

编号	射孔方式	压裂液黏度/(mPa·s)	泵注排量/(mL·min <sup>-1</sup> )
PL5	裸眼压裂	30	5
PL15	裸眼压裂	30	15
Y3	裸眼压裂	30	25
PL50	裸眼压裂	30	50

小水平主应力 3.9 MPa。

不同压裂液水力压裂试验方案。工程实践使用较多的压裂液有清水、低黏滑溜水、高黏滑溜水和冻胶等,试验设计其黏度分别为 1、5、30、100 mPa·s,泵注排量为 15 mL/min,试验的其他条件不变。

不同排量下水力压裂试验方案。采用流体流速相似原理,设计了泵注排量分别为 5、15、25、50 mL/min,压裂液黏度为 30 mPa·s,试验的其它条件不变。

2) 岩石力学特性劣化试验方案。从有裂缝的岩样中选出 23 个开展单轴、三轴压缩试验,测试弹性模量和泊松比;选出 5 个开展巴西劈裂试验,测试抗拉强度。

对无裂缝岩样选出 23 个开展单轴、三轴压缩试验,测试弹性模量和泊松比;选出 5 个岩样开展巴西

劈裂试验,测试抗拉强度。

三轴压缩试验设定围压分别为 4、8、12、16、20 MPa,分别测试抗拉强度,消除试验误差。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 水力压裂试验结果

#### 2.1.1 真三轴水力压裂物模试验结果

图 6 为不同槽间距下泵注曲线。无预制刻槽时,起裂压力为 11.25 MPa;预制刻槽后,起裂压力降为 8.23 MPa,降幅达到 26.8%,表明岩石预制裂缝后,沿裂缝更容易起裂扩展,实现了水力造缝。

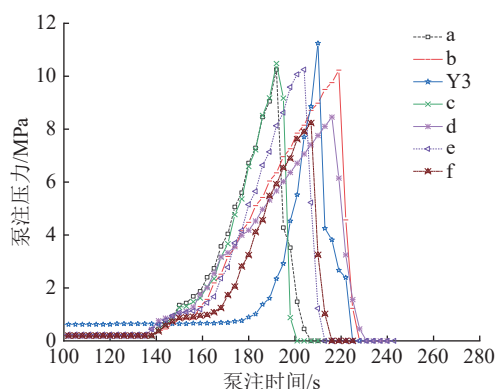


图 6 不同槽间距下泵注曲线

Fig.6 Pump injection curves under different groove spacing

图 7 为不同压裂液黏度下泵注曲线, Y1、Y2、Y3 和 Y4 对应的破裂压力分别为 7.02、8.97、11.25、13.39 MPa;达到破裂压力的时间分别为 369、264、210、138 s,表明压裂液黏度越高,流体滤失进入岩石孔隙的量越小,起压越快,越容易造缝,有效实现了水力裂缝。

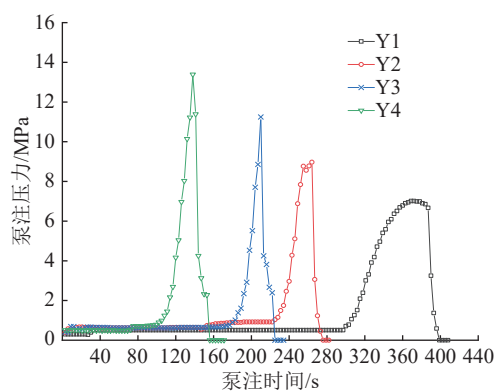


图 7 不同压裂液黏度下泵注曲线

Fig.7 Pump injection curves under different fracturing fluid viscosities

图 8 为不同排量下泵注曲线,泵注排量分别为 5、15、25、50 mL/min 对应的破裂压力分别为 9.25、

11.25、15.28、19.36 MPa;达到破裂压力的时间分别为 588、210、135、90 s。排量越低,液体滤失所占比重越大,裂缝破裂压力越小,起裂所需时间越长,增大排量,裂缝起裂压力随之增大,减少起裂所需时间,增大裂缝扩展范围与复杂程度。

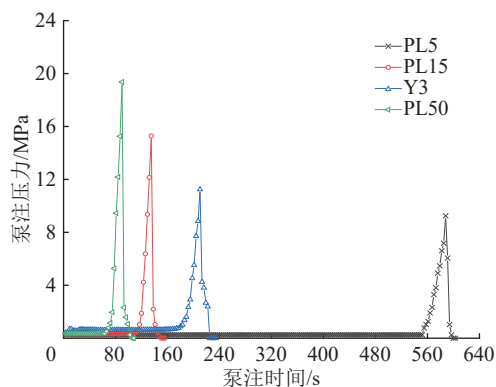


图 8 不同排量下泵注曲线

Fig.8 Pump injection curves at different injection rates

综上,通过不同的压裂参数控制,均实现了水力压裂造缝,获得了不同槽间距、液体黏度和排量与水力压裂产生裂缝的关系。

#### 2.1.2 裂缝扩展试验结果

图 9 为不同槽间距下裂缝扩展规律。试验 Y3、a、c、e 均产生了 1 条裂缝;对比试验 a 和试验 b,单边刻槽诱导形成裂缝,槽间距较大时,可以形成 2 条裂缝,增大槽的宽度,有利于提高裂缝起裂概率,但槽间距太小时,出现裂缝合并现象;对比试验 e 和试验 f,同样刻了 3 个槽,试验 e 产生了 1 条裂缝,试验 f 产生了 2 条完整裂缝和 1 条局部裂缝,因此通过预制射孔减小裂缝起裂压力。

图 10 为不同压裂液黏度下裂缝扩展形态。当压裂液黏度为  $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  时,岩样内部产生了条带形裂缝;当压裂液黏度为  $5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  时,岩样内部产生了半边形裂缝;当压裂液黏度为  $30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  时,岩样内部产生了横切面裂缝;当压裂液黏度为  $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  时,岩样内部产生了 1 条横切面裂缝和 1 条条带形裂缝。表明压裂液黏度越高,裂缝内净压力越大,裂缝扩展能力越强,产生的裂缝面积越大。因此,增加液体黏度,提高裂缝内净压力,可以迫使裂缝转向,提高裂缝复杂程度,达到充分切割岩层效果。

图 11 为不同排量下裂缝扩展形态。试验 PL5 产生了 1 条局部裂缝,未穿过整个岩石,原因在于排量小,裂缝内有效净压力低,当裂缝扩展中有一处突破边界,后续流体将持续沿着该路径流出。试验 Y3 和试验 PL15 均产生了 1 条横切缝。试验 PL50 岩样

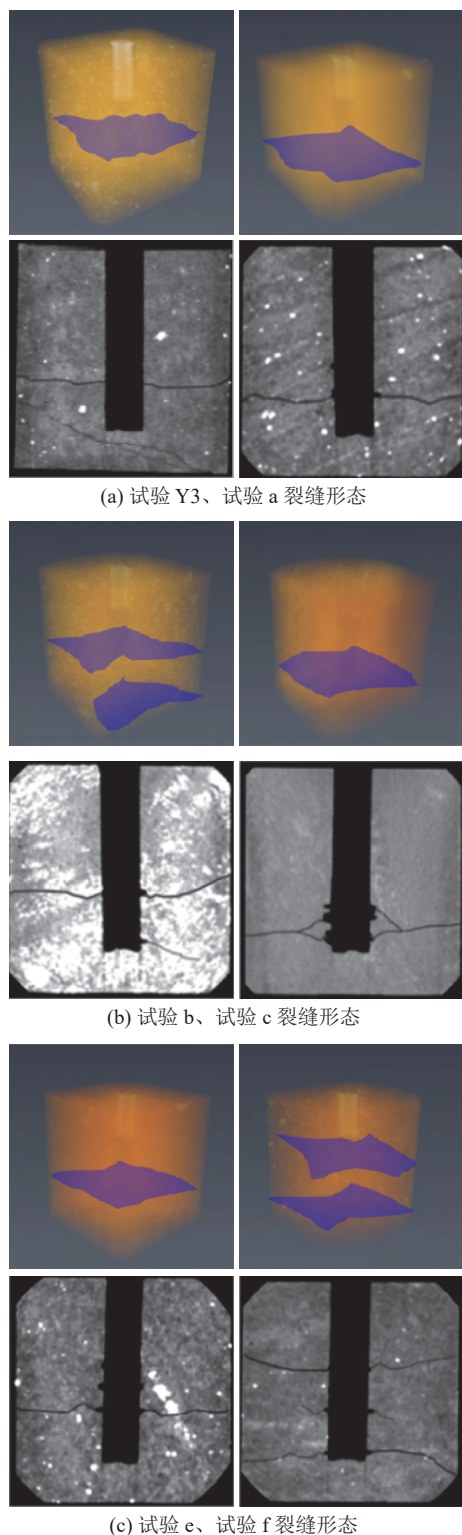


图 9 不同槽间距岩样内部裂缝形态

Fig.9 Rock samples and internal crack morphology with different groove spacing

中产生了 1 条横切缝和 1 条分支缝,原因在于当泵注排量比较高时,裂缝内快速憋压,能量大,产生了更复杂的水力裂缝。因此,应尽可能增大泵注排量,获取更高的泵注压力,从而产生更加复杂的裂缝形态,充分切割岩层。

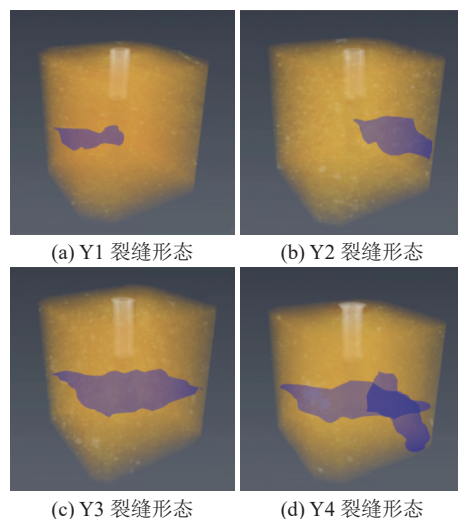


图 10 不同压裂液黏度下岩样内部裂缝形态

Fig.10 Morphological diagram of internal fractures under different fracturing fluid viscosities

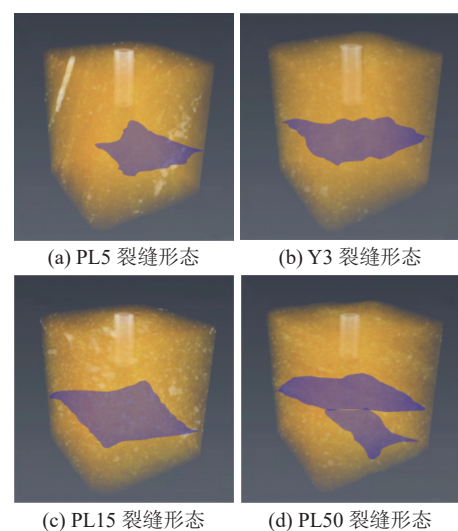


图 11 不同排量下压后岩样内部裂缝形态

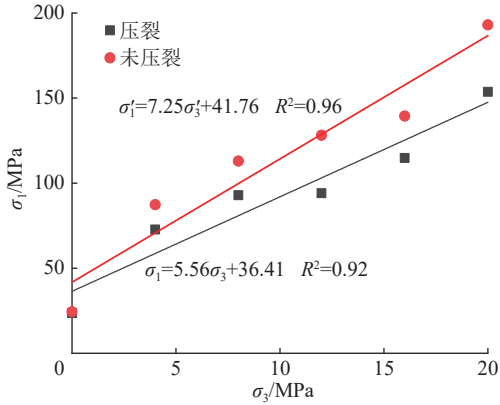
Fig.11 Internal crack morphology of rock samples under different injection rate

## 2.2 岩石水力压裂力学特性劣化试验结果

### 2.2.1 黏聚力和泊松比劣化试验结果

利用三轴压缩试验获得试件破坏时的最大主应力  $\sigma_1$ , 及相应的侧向应力  $\sigma_3$ , 在  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  坐标系中以  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$  为圆心、 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  为半径绘制不同侧向压力条件下的莫尔应力圆, 根据莫尔-库仑强度准则确定岩石的抗剪强度参数。根据各组试验试件破坏时的  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ , 以最大主应力  $\sigma_1$  为纵坐标, 侧向应力  $\sigma_3$  为横坐标绘图, 如图 12 所示。

拟合  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  最佳线性关系曲线, 并建立线性方程式  $\sigma_1 = a\sigma_3 + R_c$  (其中,  $a$  为  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  关系曲线斜率;  $R_c$  为  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  关系曲线在  $\sigma_1$  轴的截距, 即试样单轴抗压强

图 12  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  关系曲线Fig.12  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  relationship curves

度, MPa), 如式 (1) 所示:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 5.56\sigma_3 + 36.41, R^2 = 0.92 \\ \sigma_1' &= 7.25\sigma_3' + 41.76, R^2 = 0.96\end{aligned}\quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_1'$  分别为压裂、未压裂状态下的最大主应力, MPa;  $\sigma_3$ 、 $\sigma_3'$  分别为压裂、未压裂状态下的侧向应力, MPa。

根据拟合结果可求  $\tan \varphi = \frac{a-1}{2\sqrt{a}}$ , 将压裂前后数据代入, 可计算得到 2 种状态下的内摩擦角  $\varphi$  和  $\varphi'$ 。

$$\begin{aligned}\tan \varphi &= \frac{a-1}{2\sqrt{a}} = \frac{5.56-1}{2 \times \sqrt{5.56}} = 0.97 \\ \tan \varphi' &= \frac{a'-1}{2\sqrt{a'}} = \frac{7.25-1}{2 \times \sqrt{7.25}} = 1.16\end{aligned}\quad (2)$$

经计算, 得到压裂状态下内摩擦角  $\varphi$  为  $44.13^\circ$ , 未压裂状态下  $\varphi'$  为  $49.24^\circ$ 。

黏聚力  $c = \frac{R_c}{2\sqrt{a}}$ , 将式 (1) 代入, 可得黏聚力分别为

$$\begin{aligned}c &= \frac{R_c}{2\sqrt{a}} = \frac{36.41}{2 \times \sqrt{5.56}} = 7.72 \text{ MPa} \\ c' &= \frac{R_c'}{2\sqrt{a'}} = \frac{41.76}{2 \times \sqrt{7.25}} = 7.75 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (3)$$

式中:  $c$ 、 $c'$  分别为压裂、未压裂状态下的黏聚力, MPa。

计算对应折减系数  $\alpha$ , 可得:

$$\begin{aligned}\alpha_\varphi &= \frac{\varphi}{\varphi'} = \frac{44.13^\circ}{49.24^\circ} = 0.896 \\ \alpha_c &= \frac{c}{c'} = \frac{7.72}{7.75} = 0.996\end{aligned}\quad (4)$$

式中:  $\alpha_\varphi$  为内摩擦角的折减系数;  $\alpha_c$  为黏聚力的折减系数。

### 2.2.2 弹性模量劣化试验结果

根据试验数据, 绘制不同围压下试样弹性模量

演化规律, 并计算对应围岩下折减系数, 如图 13 所示。

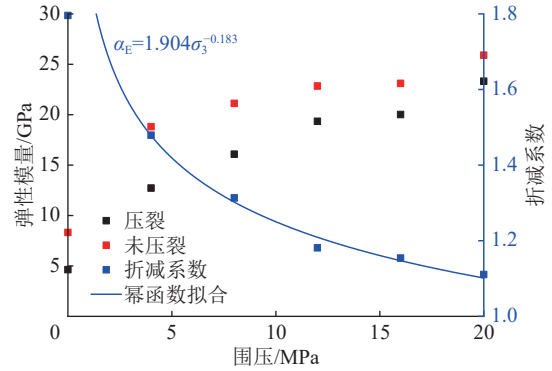


图 13 弹性模量随围压演化规律

Fig.13 Evolution of elastic modulus with confining pressure

由图 13 可知, 随围压增大, 弹性模量均呈增大趋势, 且增大速率逐渐减缓。而折减系数随围压增大呈降低趋势, 但降低速率减缓。采用幂函数拟合折减系数随围压变化规律, 如式 (5) 所示:

$$\alpha_E = 1.904\sigma_3^{-0.183}\quad (5)$$

根据式 (5) 可估算不同围压下岩石压裂前后弹性模量折减系数, 便于工程实践应用。

### 2.2.3 抗拉强度劣化结果

由图 14 可知, 试样抗拉强度由压裂前的 4.707 MPa 降低至 1.389 MPa, 降低 3.318 MPa, 降幅 70.49%, 降低量达压裂后试样的 2.39 倍。压裂前最大抗拉强度为 4.85 MPa, 压裂后最低抗拉强度仅为 1.19 MPa, 仅为压裂前 1/4。试样抗拉强度显著降低, 表明压裂使试样内部产生裂隙, 发生损伤。

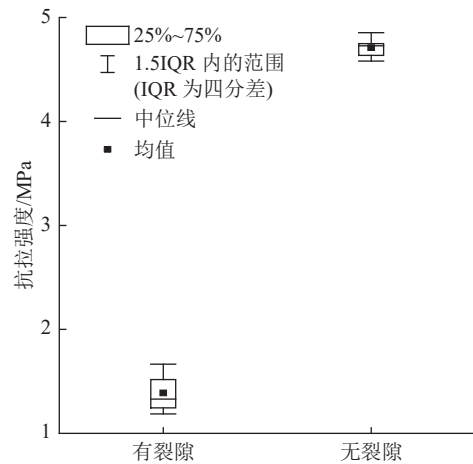


图 14 试样抗拉强度对比

Fig.14 Comparison of tensile strength of specimens

压裂前试样抗拉强度标准差为 0.095 MPa, 压裂后增大至 0.178 MPa, 增大 1.87 倍, 表明压裂过程使

试样内部产生大量非均匀分部裂隙,导致标准试样制备过程时,每个试样中包含的微裂隙数量及分布存在较大差异,因此,试样力学性能差异较大。

计算试样抗拉强度折减系数 $\alpha_t$ 为

$$\alpha_t = \frac{t}{t'} = \frac{1.389}{4.707} = 0.295 \quad (6)$$

式中: $t$ 为压裂试样抗拉强度,MPa; $t'$ 为未压裂试样抗拉强度,MPa。

#### 2.2.4 泊松比劣化试验结果

根据试验数据绘制不同围压下试样泊松比演化规律,如图 15 所示。当围压为 12 MPa 时,未压裂试样泊松比显著高于压裂试样,但当围压为 8 MPa 时,压裂试样泊松比略高于未压裂试样。对比不同围压下 2 种试样泊松比发现,2 种试样的泊松比差异并不明显,试验中试样是否被压裂对试样的泊松比几乎无影响。

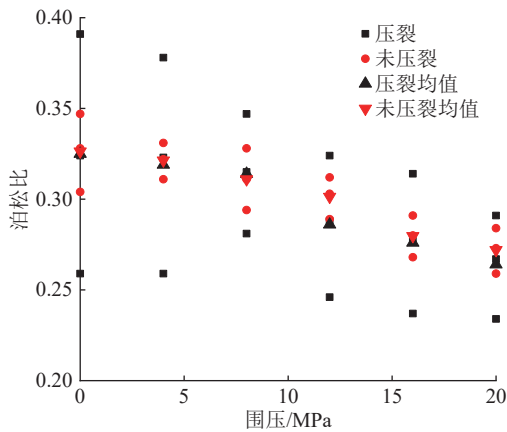


图 15 泊松比随围压演化规律

Fig.15 Evolution of poisson's ratio with confining pressure

由图 15 可知,虽然压裂与未压裂试样泊松比差异不明显,但是,不同围压下 2 种试样泊松比均呈减小趋势,且减小速率逐渐增大。图 15 中红色数据点被黑色数据点包围,即压裂后试样泊松比离散性显著增大,这是压裂后试样内部压裂裂纹数量及分布非均质的表现。离散性随围压的增大呈减小趋势,原因在于高围压对原生缺陷的抑制作用。

#### 2.2.5 不同加载方式劣化试验结果

从单轴和三轴加载 2 种方式中各选取 1 组典型试样试验进行对比,如图 16 所示。相同围压下,未压裂试样强度及弹性模量均显著高于压裂试样,但随着围压升高,2 种试样力学性质差异逐渐减小。

由图 16 可知,单轴加载下,未压裂试样强度约为压裂试样的 1.63 倍;弹性模量约为 1.80 倍。当围压为 12 MPa 时,未压裂试样强度约为压裂试样的

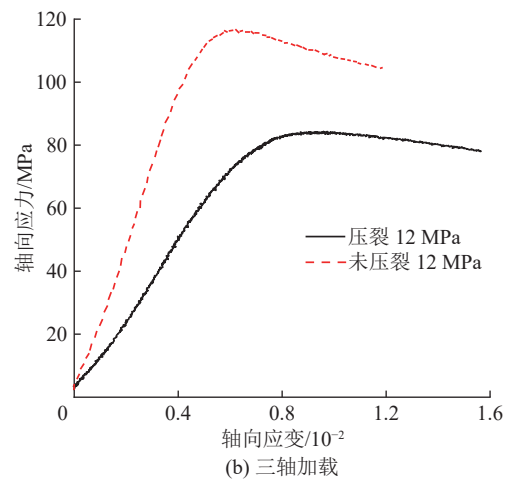
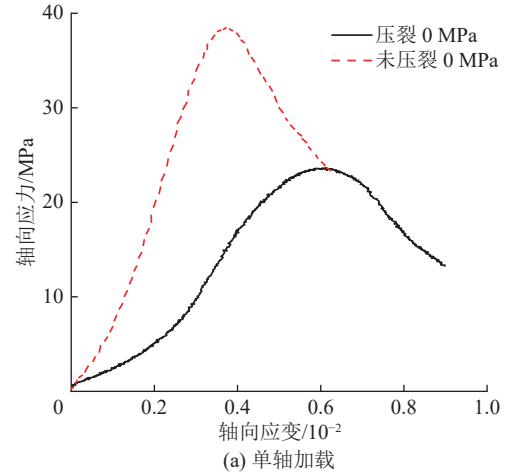


图 16 2 种加载方式下试样力学行为对比

Fig.16 Comparison of mechanical behavior of specimens under two loading methods

1.38 倍;弹性模量约为 1.18 倍,2 种试样力学性质的差异随着围压的增大而降低,表明围压可在一定程度上抑制原生裂隙尖端扩展。

对比 2 种试样应力-应变曲线发现,压裂后试样压密阶段更明显,表现为以下 2 个现象:①压密阶段持续更长。②压密阶段应力-应变曲线的弧度更大,即压密阶段弹性模量变化范围更大。由于低围压试样弹性变形阶段弹性模量较低,因此,低围压试样初始模量更低。2 种围压下的加载试验均为先三向等压加载至预定围压,最大主应力方向持续加载至试样破坏。加围压阶段,试样已经经历压密过程,因此,围压升高,压密阶段缩短。初始围压可使原生缺陷闭合,力学性质得到提升,因此初始弹性模量更高。

压裂试样峰后阶段弹性模量低于未压裂试样,即试样脆性降低。未被水力压裂的试样内部缺陷较少,加载过程中,裂隙在试样内部原生缺陷尖端开始发育扩展,由于未压裂试样原生缺陷较少,因此,新生裂隙的数量少且分布较集中,载荷达到极限承载

能力时, 试样整体完整性更高, 峰后脆性更强。

### 3 结 论

1) 试验有效获取了含水力裂缝的试样, 为开展水力压裂劣化岩石力学性质研究提供有效途径。利用不同槽间距、液体黏度和泵注排量可以有效产生岩石水力裂缝, 分析了不同因素对缝网的影响, 通过 CT 扫描重构裂缝三维形态, 揭示了刻槽能够有效降低裂缝破裂压力, 有利于提高裂缝起裂概率, 压裂液黏度越高, 泵注压力起压越快, 裂缝破裂压力越高、排量越高、裂缝起裂所需时间越短。

2) 试验得到水力压裂前后岩石试样内摩擦角折减系数为 0.896, 黏聚力的折减系数为 0.996, 抗拉强度折减系数为 0.295。试样抗拉强度压裂后降幅 70.49%, 降低量达压裂后试样的 2.39 倍, 试样抗拉强度显著降低, 表明压裂使试样内部产生裂隙, 发生损伤。压裂前后标准差增大 1.87 倍, 表明压裂过程使试样内部产生大量非均匀分布裂隙, 微裂隙数量及分布特征存在较大差异, 造成试样力学差异较大。

3) 试验获得了不同围压下压裂前后弹性模量折减系数关系式, 折减系数随围压增大呈降低趋势; 揭示了压裂与未压裂岩石试样泊松比差异不明显, 但不同围压下试样的泊松比均呈减小趋势, 且减小速率逐渐增大, 压裂后试样的泊松比离散性显著增大, 主要是压裂后试样内部压裂裂纹数量及分布非均质的表现。

#### 参考文献(References):

- [1] GREBE J J, STOESSER S M. Increasing crude production 20, 000, 000 barrels from established fields[J]. *World Petroleum Journal*, 1935(8): 473-482.
- [2] 张搏, 李晓, 王宇, 等. 油气藏水力压裂计算模拟技术研究现状与展望[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(2): 301-310.  
ZHANG Bo, LI Xiao, WANG Yu, et al. Current status and prospect of computer simulation techniques of hydraulic fracturing in oil and gas field[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(2): 301-310.
- [3] CLARK J B. A hydraulic process for increasing the productivity of wells[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1949, 1(1): 1-8.
- [4] MONTGOMERY C T, SMITH M B. Hydraulic fracturing: History of an enduring technology[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2010, 62(12): 26-40.
- [5] 窦林名, 曹晋荣, 曹安业, 等. 煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 23-31.  
DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shock waves[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 23-31.
- [6] 高明仕, 徐东, 贺永亮, 等. 厚硬顶板覆岩冲击矿震影响的远近场效应研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 215-226.  
GAO Mingshi, XU Dong, HE Yongliang, et al. Investigation on the near-far field effect of rock burst subject to the breakage of thick and hard overburden[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(2): 215-226.
- [7] 曹安业, 窦林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 1894-1918.  
CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1894-1918.
- [8] 白贤栖, 曹安业, 杨耀, 等. 高位巨厚覆岩运移规律及矿震触发机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(3): 10-20.  
BAI Xianxi, CAO Anye, YANG Yao, et al. Study on movement law of extremely thick strata and triggering mechanism of mine earthquakes[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(3): 10-20.
- [9] 尚晓光, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 地面直井水压致裂防控巨厚硬岩运动型矿震试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S2): 639-650.  
SHANG Xiaoguang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Experimental study on prevention and control of sports mine earthquake in super-thick hard rock by ground vertical well water pressure fracturing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 639-650.
- [10] 于斌, 高瑞, 夏彬伟, 等. 大空间坚硬顶板地面压裂技术与应用[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 800-811.  
YU Bin, GAO Rui, XIA Binwei, et al. Ground fracturing technology and application of hard roof in large space[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 800-811.
- [11] 潘俊锋, 陆闯, 马小辉, 等. 井上下煤层顶板区域压裂防治冲击地压系统及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 106-115.  
PAN Junfeng, LU Chuang, MA Xiaohui, et al. System and application of regional fracking of coal seam roof on and under the ground to prevent rockburst[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 106-115.
- [12] 史璨, 林伯韬. 页岩储层压裂裂缝扩展规律及影响因素研究探讨[J]. *石油科学通报*, 2021, 6(1): 92-113.  
SHI Can, LIN Botao. Principles and influencing factors for shale formations[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6(1): 92-113.
- [13] 吴拥政. 回采工作面双巷布置留巷定向水力压裂卸压机理研究及应用[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.  
WU Yongzheng. Study on de-stressing mechanism of directional hydraulic fracturing to control deformation of reused roadway in longwall mining with two gate road layout and its onsite practices[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.
- [14] ADVANI S H, LEE J K. Finite element model simulations associated with hydraulic fracturing[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1982, 22(2): 209-218.
- [15] BOUTECA M J. 3D analytical model for hydraulic fracturing: Theory and field test[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1984.
- [16] 于斌, 段宏飞. 特厚煤层高强度综放开采水力压裂顶板控制技

- 术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 778–785.
- YU Bin, DUAN Hongfei. Study of roof control by hydraulic fracturing in full-mechanized caving mining with high strength in extra-thick coal layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 778–785.
- [17] 冯彦军, 康红普. 定向水力压裂控制煤矿坚硬难垮顶板试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1148–1155.
- FENG Yanjun, KANG Hongpu. Test on hard and stable roof control by means of directional hydraulic fracturing in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1148–1155.
- [18] 蔡峰, 张逸龙, 徐辉, 等. 基于坚硬顶板应力弱化的回采巷道大变形控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(9): 37–41, 86.
- CAI Feng, ZHANG Yilong, XU Hui, et al. Large deformation control technology of gateway based on stress weakened hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(9): 37–41, 86.
- [19] 刘江伟, 周广磊, 武娜. 人工裂缝形态对煤的抗拉性能及能量积聚的弱化规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(5): 81–90.
- LIU Jiangwei, ZHOU Guanglei, WU Na. Weakening effect of artificial fracture morphology on the tensile strength and energy accumulation of coal[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(5): 81–90.
- [20] 刘新荣, 尹志明, 王艳磊. 含 V 型相交裂隙岩体的力学特性及破坏模式试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 651–659.
- LIU Xinrong, YIN Zhiming, WANG Yanlei. Mechanical properties and failure mode of rock mass containing V-type in intersecting fissures[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 651–659.
- [21] 刘新荣, 刘馨琳, 许彬, 等. 含 Z 型相交裂隙岩体剪切力学行为研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1872–1880.
- LIU Xinrong, LIU Xinlin, XU Bin, et al. Shear mechanical behavior of rock mass containing z-type intersecting fractures with laboratory test[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1872–1880.
- [22] 朱志洁, 姚振华, 王来贵, 等. 裂隙分布对煤岩体冲击倾向性影响机制试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 554–562.
- ZHU Zhijie, YAO Zhenhua, WANG Laigui, et al. Experimental study on the influence mechanism of cracks distribution on coal-rock bursting liability[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(3): 554–562.