缓倾斜坚硬顶板水力压裂响应特征及破坏规律研究*

赵志鹏[1]，郑凯歌[2]，祁晓东[1]，王泽阳[2]，孔令宇[1]，崔峰[3]，杨森[1]，刘浩[3]，王豪杰[2]

（1.国家能源集团新疆能源有限责任公司， 新疆 乌鲁木齐 830027；
2.中煤科工西安研究院（集团）有限公司， 陕西 西安 710054；
3.西安科技大学 能源与矿业工程学院， 陕西 西安 710054）

摘要：为探究缓倾斜坚硬顶板水力压裂作用下岩层裂缝展布规律及确定水力压裂临界起裂应力范围，以宽沟煤矿I010206工作面为工程背景，结合顶板围岩材料力学性质，制备相似材料试件，采用真三轴水力压裂试验装置，在σ_H=12.8～13.9 MPa、σ_h=6.5～8.1 MPa、σ_v=5 MPa应力条件及40 mL/min注水流量下，开展不同应力与起裂压力物理模拟试验，并借助数值模拟软件分析裂隙三维空间分布特征。结果表明：水平应力差对裂缝扩展形态具有显著影响，低应力差下裂缝呈单侧优势扩展，换算至原型的扩展面积达4.25 m^2，高应力差下裂缝呈对称双翼状，扩展阻力增大、面积减小至3.84 m^2；声发射事件数为3 698～4 702个、幅值峰值为83.2～121.1 dB，其演化特征与裂缝起裂、扩展高度相关；确定了该矿坚硬顶板水力压裂的起裂压力范围为10.80～16.79 MPa，其中临界起裂压力建议取16.79 MPa作为工程下限。工程应用结果显示，该压裂参数可显著减小悬顶面积，使冲击风险显著降低。研究结果可为深部矿井顶板压裂方案设计与灾害防控提供理论支撑与工程参考。

关键词：坚硬顶板；三轴应力；水力压裂；裂缝扩展；数值模拟

中图分类号：TD323 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)05-0151-13

Study on the Response Characteristics and Failure Law of Hydraulic Fracturing in Gently Inclined Hard Roofs

Zhao Zhipeng[1], *Zheng Kaige*[2], *Qi Xiaodong*[1], *Wang Zeyang*[2], *Kong Lingyu*[1], *Cui Feng*[3], *Yang Sen*[1], *Liu Hao*[3], *Wang Haojie*[2]

(1.CHN Energy Group Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830027, China;
2.CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;
3.College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: To investigate the fracture distribution law of rock strata under hydraulic fracturing in gently inclined hard roofs and to determine the critical initiation stress range of hydraulic fracturing, this study takes the I010206 working face of Kuangou Coal Mine as the engineering background. Based on the mechanical properties of the roof surrounding rock, similar material specimens were prepared. Using a true triaxial hydraulic fracturing experimental apparatus, physical simulation experiments under different stresses and initiation pressures were conducted under stress conditions of σ_H=12.8-13.9 MPa, σ_h=6.5-8.1 MPa, and σ_v=5 MPa, with a water injection flow rate of 40 mL/min. Furthermore, numerical simulation software was employed to analyze the three-dimensional spatial distribution characteristics of the fractures. The results show that the horizontal stress difference has a significant influence on the fracture propagation morphology. Under low stress difference conditions, fractures exhibit unilateral dominant propagation, with the scaled-up propagation area reaching 4.25 m^2. Under high stress difference conditions, fractures are symmetrically double-winged, with increased propagation resistance and a reduced area of 3.84 m^2. The number of acoustic emission events ranges from 3 698 to 4 702, and the peak amplitude ranges from 83.2 to 121.1 dB. The evolution characteristics are related to the height of fracture initiation and propagation. The initiation pressure range for hydraulic fracturing in the hard roof of this mine is determined to be 10.80-16.79 MPa, and a critical initiation pressure of 16.79 MPa is recommended as the lower engineering limit. Engineering application results demonstrate that these fracturing parameters can significantly reduce the suspended roof area and markedly lower the risk of rock bursts. The research

* **收稿日期**：2025-05-22
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52422404)；西安研究院科技创新基金资助项目(2022XAYJS04)
作者简介：赵志鹏(1987—)，男，山东德州人，工程师，主要从事矿压与瓦斯动力灾害防治方面的研究。E-mail:736997336@qq.com
通信作者：郑凯歌(1988—)，男，河南周口人，博士，副研究员，主要从事矿井地质、煤矿矿压与瓦斯动力灾害防治方面的研究。E-mail:13655617009@163.com

results can provide theoretical support and engineering reference for the design of roof fracturing schemes and disaster prevention and control in deep mines.

Key words: Hard roof, Triaxial stress, Hydraulic fracturing, Fracture propagation, Numerical simulation

0 引言

坚硬顶板具有厚度大、整体性强、强度高、结构致密、节理裂隙不发育及自身承载力强等特征,在矿井深部长壁开采过程中[1],煤岩体持续向采空区移动,易积聚大量弹性能,顶板大面积悬露且无法及时垮落,地压持续升高,从而导致煤岩体损伤与崩落的风险显著增大[2-4]。因此,开展岩样水力压裂响应特征及其破坏规律研究,探讨压裂过程中裂隙展布规律,反演水力压裂裂缝的空间分布特征,可为矿井顶板压裂方案选型与压裂效果评价提供有效参考。

岩石破坏是由内而外的细观裂隙生成、发展直至贯通的全过程,其在含裂隙介质中的强度及对应荷载作用下的演化规律已成为目前国内外研究的热点。在建立裂纹尖端区域应力-应变场与材料断裂控制物理参量间的关系方面[5-6],王小琼等[7]采用真三轴水力压裂物理模拟试验方法,结合声发射定位技术与特征参数分析方法,系统研究了页岩水力裂缝动态扩展规律。陈瑞杰等[8]制备煤岩复合相似材料,利用真三轴水力压裂试验系统,开展了多工况下煤层顶板水力致裂模拟试验。王佳澍等[9]利用自主研发的压裂试验系统开展岩样水力压裂测试,结合核磁共振成像技术对压裂全周期孔隙网络演化规律进行动态追踪与量化解析。姜永东等[10]基于真三轴加载装置试验平台,结合格里菲斯断裂力学理论,推导了裂隙岩体在流体压力作用下的破裂判据模型,该模型可定量表征岩石破裂的临界水压阈值及裂缝初始扩展方向。邓广哲等[11]为研究不同煤岩介质压裂条件下水压钻孔裂隙起裂压力、起裂位置的变化规律,梳理现有理论,并对比分析了连续介质弹性理论与非连续介质断裂理论两种经典模型的异同。吕茂淋等[12]针对深部地层岩体水力压裂裂隙扩展问题,基于相场法、Biot 多孔弹性介质力学与渗流力学理论建立了相场法应力-渗流耦合模型。吕玉磊等[13]针对煤矿常用超前钻孔水力压裂切顶卸压技术难以处理厚层坚硬复合顶板问题,提出基于煤矿井下多点拖动式裸眼分段压裂成套装备,形成了煤矿井下复合坚硬顶板超长钻孔分段压裂区域弱化解危工艺。

在水力压裂施工效果评估方面,石垚等[14]通过对比分析常见水力压裂监测方法与监测方案差异,揭示了微震监测技术的优越性,并探讨了水力压裂效果评估技术。林志斌等[15]以隆德煤矿 213 综采工作面为背景,采用 FLAC 数值模拟软件建立其末采阶段数值模型,考虑水力压裂前后岩体力学特性变化,对比分析了水力压裂对末采悬顶长度及矿压显现的影响。马玉镇等[16]以孟村煤矿 401102 综采工作面为工程背景,采用理论建模、原位监测与颗粒流数值模拟相结合的方法,系统研究了地面水力压裂技术作用下采场覆岩结构的演化规律及控制机理。钟坤等[17]针对坚硬顶板岩层易诱发应力集中,且大范围悬顶结构失稳产生的动态载荷扰动易触发冲击地压的难题,以东滩煤矿 6303 综采工作面为工程背景,通过区域性弱化高强度顶板岩层,有效控制了采场覆岩结构的稳定,实现了冲击地压灾害的主动防控。

综上所述,现有研究已围绕水力压裂试验与现场水力压裂效果评估开展了大量的工作,业界学者如翁明月等[18]、王国义等[19]、吴雅琴等[20]也进行深入的分析研究。但缓倾斜坚硬顶板水力压裂试验研究仍较为薄弱。因此,本文以宽沟煤矿为工程背景,设计 3 种试验方案并开展水力压裂物理模拟试验,揭示不同应力条件下水力压裂岩体裂隙展布形态、扩展规律及能量时空分布特征,确定水力压裂施工起裂压力合理范围,为宽沟煤矿水力压裂工程实践提供理论支撑。

1 水力压裂试验系统与方案设计

1.1 试样选取

试验试样采用相似材料制备。相似材料是指力学、物理或化学性质与原型材料相似,而在尺寸、制备成本或制备工艺等方面与原型存在差异的替代材料。真三轴水力压裂试验中,采用相似材料制作的试样可有效降低试验成本、提高试验效率,且能在一定程度上模拟天然岩石的力学行为。

综合真三轴试验机加载室的加载尺寸,依据物理相似准则,按水泥∶细沙=1∶3.5 的质量比制备尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm 的水泥砂浆试样,试样中心布置直径为 6 mm、长度为 12 mm 的

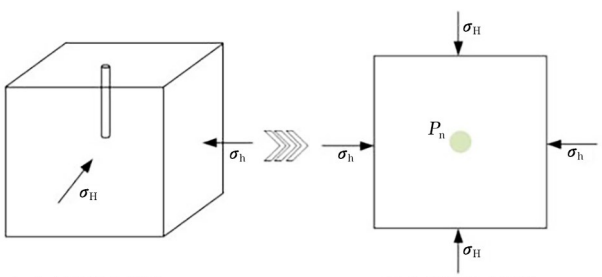
贯穿式注水孔。结合实验室试样尺寸与强度特征,采用内壁预置 PVC 管的方式模拟钻孔,浇筑试样时将 PVC 管同步预埋于试样中。

1.2 水力压裂孔起裂应力的确定

试验方案设计前,首先确定水力压裂钻孔的起裂应力。基尔施方程是描述均匀线弹性平板在单轴拉伸载荷作用下,内部圆孔附近二维弹性应力场分布规律的经典理论模型。对于无限大均匀线弹性平板中心处半径为 a 的圆孔,在单轴拉伸应力 σ 作用下,其周边应力场分布可通过基尔施方程精确描述。实验室真三轴水力压裂测试的实际应力状态,可在垂直与钻孔轴线的平面上简化为二维应力状态,如图 1 所示。因此,根据基尔施方程,可以推导出如下方程:

$$\begin{cases}\sigma_r=\dfrac{(\sigma_H+\sigma_h)\left(1-\dfrac{r_n^2}{r^2}\right)}{2}-\\ \dfrac{(\sigma_H-\sigma_h)\left(1+3\dfrac{r_n^4}{r^4}-4\dfrac{r_n^2}{r^2}\right)\cos 2\theta}{2}+P_n\dfrac{r_n^2}{r^2}\\ \sigma_t=\dfrac{(\sigma_H+\sigma_h)\left(1+\dfrac{r_n^2}{r^2}\right)}{2}-\\ \dfrac{(\sigma_H-\sigma_h)\left(1+3\dfrac{r_n^4}{r^4}\right)\cos 2\theta}{2}-P_n\dfrac{r_n^2}{r^2}\end{cases}\tag{1}$$

式中:σ_r 为径向应力;σ_t 为切向应力;σ_H 为最大水平主应力;σ_h 为最小水平主应力;r_n 为钻孔半径;r 为测点到钻孔中心的距离;θ 为测点到钻孔中心的连接线与最大主应力方向的夹角;P_n 为钻孔内注入压力。



(a) 三维应力状态　　(b) 二维应力状态

图 1 三维转换至二维

Fig.1 Conversion from 3D to 2D

当孔壁处切向应力的绝对值大于岩石抗拉强度 T 时,孔壁将产生张性裂缝。所以当 $\theta=0°$ 或 $r=r_n$ 时,破裂压力 P_h 为:

$$P_h=3\sigma_h-\sigma_H-\sigma_\theta=3\sigma_h-\sigma_H+T \tag{2}$$

根据上述公式,采用 Matlab 软件编程计算单孔模型的应力分布特征。在 Matlab 软件中编写自动绘图程序,根据新疆宽沟煤矿地应力范围设定围岩应力,分析试样表面破裂前的应力分布。宽沟煤矿地应力及岩石力学参数见表 1;将实测试样的物理力学特性参数输入模型,见表 2。

表 1 宽沟煤矿地应力及力学参数

Table 1 Geostress and mechanical parameters of Kuangou Coal Mine

最小主应力/MPa	最大主应力/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
5.50～7.37	12.8～13.9	7.14～8.02	0.24

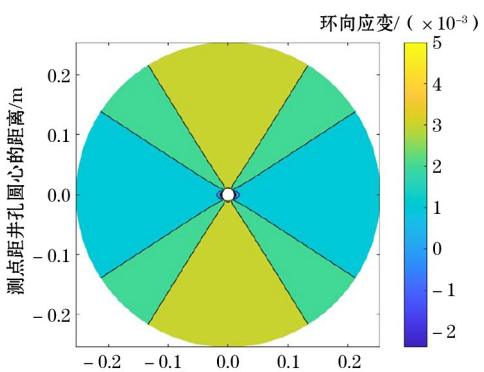
表 2 Matlab 建模参数

Table 2 Matlab modeling parameters

试样编号	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	θ/(°)	σ_H/MPa	σ_h/MPa	井孔半径/mm	距孔径距离/mm
1	23.43	3173	0.186	0～360	12.8	6.5	10	0～280
2					12.8	8.1		
3					13.9	6.5		
4					13.9	8.1		

基于 Matlab 软件,在二维单孔模型中确定了样品表面破裂前压裂压力与应力的理论值,并自动生成应力轮廓图与极坐标关系图。随后,提取程序计算值与生成的图像,与试样的实际测试结果进行对比分析。

在二维模型边界施加平面最大主应力 σ_H 和最小主应力 σ_h 的条件下,图 2(a)至图 2(d)为中心孔内壁承受 12 MPa 均匀压力时的应变分布特征。研究发现,切向应变随距孔壁距离的增加呈先快速衰减后趋于稳定的变化趋势。模型各区域切向应变均呈拉应变状态,其中钻孔间区域应变增幅显著低于其他区域,钻孔左右两侧形成了明显的应变集中区。值得注意的是,沿中心孔横向存在弱压应变区域,该特征与其他区域的拉应变分布形成显著差异。



(a) 1 号试样

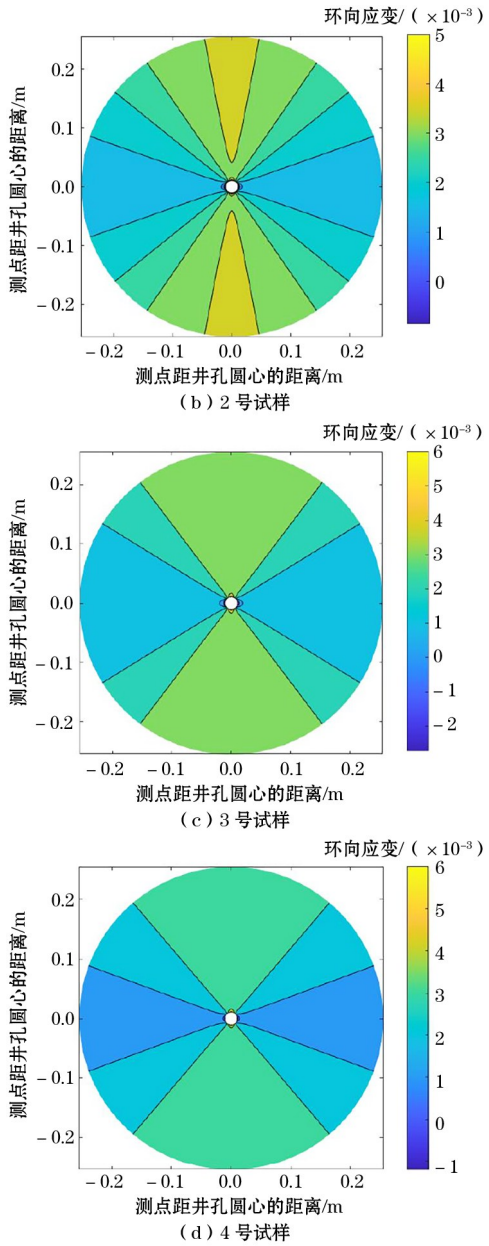


图 2 模型钻孔周围应变分布

Fig.2 Strain distribution around the model borehole

由图 3 应力-距离关系曲线可以看出,钻孔周围的切向应力与径向应力随距孔壁距离的增加呈先急剧变化后趋于稳定的分布规律。当 $\theta=0°$时,切向应力呈从压应力向拉应力的转变特征。值得注意的是,距孔壁 70 mm 处的切向应力与径向应力受注入压力变化的影响较小,表明孔壁断裂前应力值无显著变化。基于试样物理模拟的试验测试,得到起裂压力 P_h 分别为 9.173 MPa、13.732 MPa、8.073 MPa 和 12.673 MPa。结合表 1,确定工作面基本顶的水力起裂压力范围为 10.80～16.79 MPa。考虑工程安全冗余,确定将区间上限值 16.79 MPa 作为压裂施工的最低压力标准。

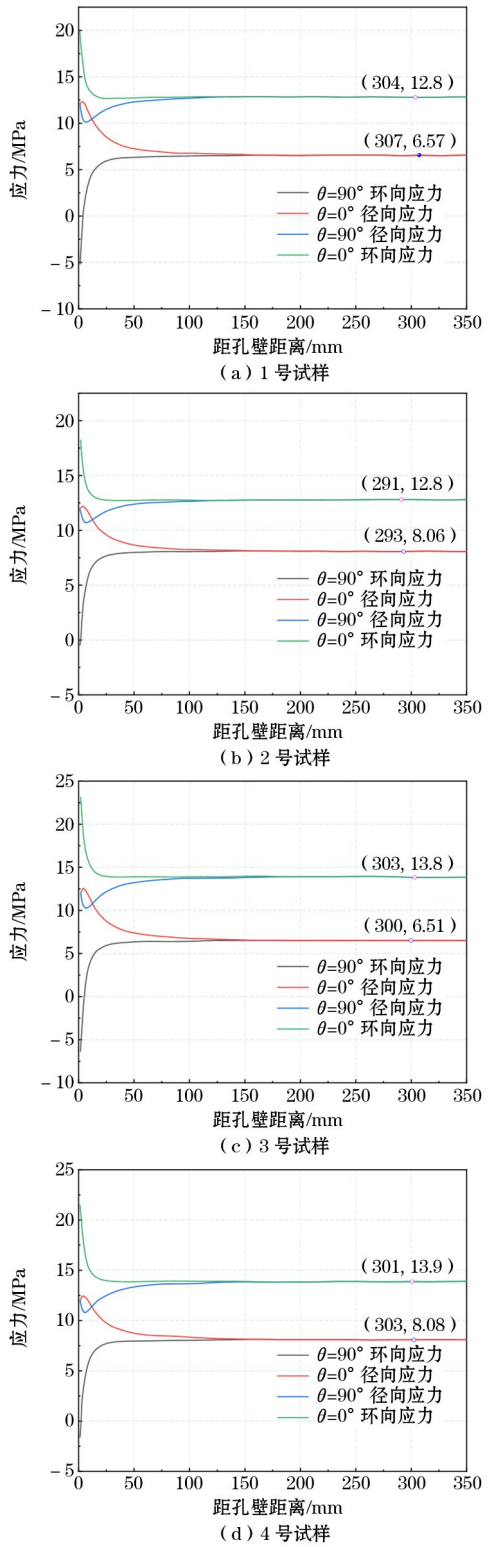


图 3 应力-距离关系曲线

Fig.3 Stress-distance relationship curves

1.3 试验方案设计

岩石水力压裂试验设计包括声发射参数设定、真三轴围压水平设置、注水流量控制、水力压裂过程

声发射采集阶段划分。基于表 1 测定的岩石力学基本参数，设计施加应力方案见表 3，以还原宽沟煤矿首采区真实地应力环境，模拟实际地质条件下的多种应力状态。声发射传感器布置方案如图 4 所示，σ_H 与 σ_h 为水平方向主应力，σ_v 为竖直应力，试验过程中控制注水流量为 40 mL/min。

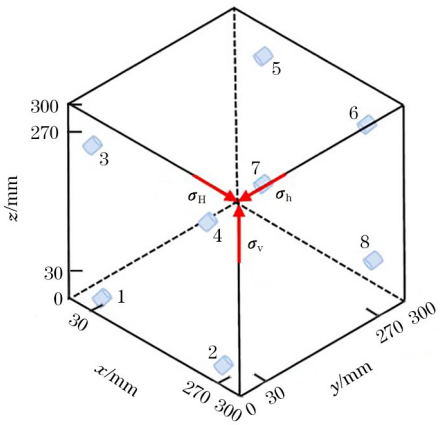


图 4　应力场加载方向及传感器空间分布

Fig.4　Stress field loading direction and sensor spatial distribution

表 3　三向围压方案

Table 3　Three-axial consolidation schemes

方案	σ_H/MPa	σ_h/MPa	σ_v/MPa
一	12.8	6.5	5
二	13.9	6.5	5
三	13.9	8.1	5

具体试验步骤如下：

(1) 采用密封垫或植筋胶密封岩样预留的注水孔与压裂管的间隙；

(2) 安装声发射探头后将岩样置入胶筒，在胶筒顶部安放塞头与密封盖，采用密封胶密封后，将其置于错位加载组件上，并将组件整体固定于高压腔中；

(3) 密封高压腔后向腔内注满水，为试验测试提供最小主应力环境；

(4) 试样所受各方向的静水压力由围压与外缸载荷叠加而成，需减去二者重叠部分(即刚性加载杆的反作用力)，其计算公式见式(3)；

(5) 打开压裂系统阀门与进气阀，启动恒压注液泵，设定泵压参数后，开始注入压裂液；

(6) 在压裂管口安装压力传感器，实时监测压裂过程中压裂压力等参数的变化规律，当压裂气压与压裂压力趋于一致时，可判定压裂结束。

$$\begin{cases} \overline{F}_{反}=\pi\times0.06\times0.06\times\sigma_v=0.011\ 304\ \sigma_v \\ \sigma_H=\dfrac{T_H-0.011\ 304\ \sigma_v}{l^2}+\sigma_v \\ \sigma_h=\dfrac{T_h-0.011\ 304\ \sigma_v}{l^2}+\sigma_v \end{cases} \tag{3}$$

式中：$F_{反}$ 为刚性加载杆的反作用力，N；T_H 和 T_h 分别为 σ_H 和 σ_h 方向伺服油缸载荷，N；l 为试样边长，mm。经计算，三向围压方案对应的伺服油缸载荷设置参数见表 4。

表 4　伺服油缸载荷设置参数

Table 4　Servo cylinder load setting parameters

方案	T_H/kN	T_h/kN
一	758.5	191.5
二	857.5	191.1
三	857.5	335.5

1.4　水力压裂试验系统

本次试验采用的水力压裂试验设备为新型真三轴试验装置平台。图 5 为真三轴水力压裂试验系统组成，真三轴水力压裂加载试验装置主要由 6 部分组成：高压腔体、声发射监测系统、围压加载系统、真空系统、压裂系统和数据采集系统。

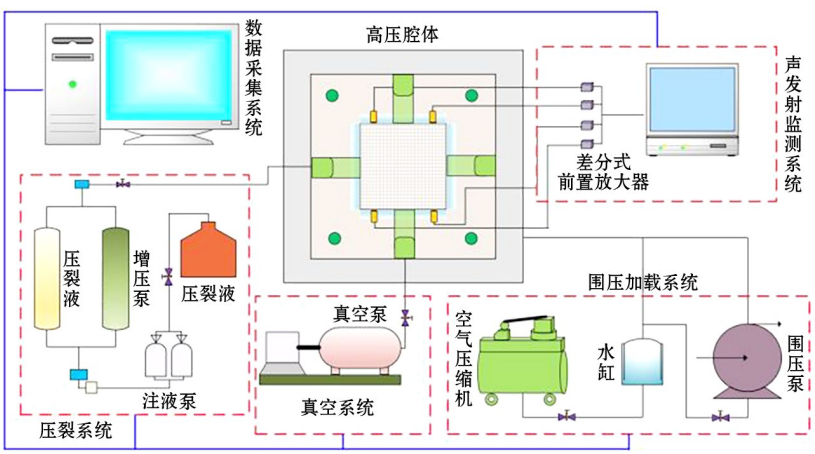


图 5　真三轴水力压裂试验系统

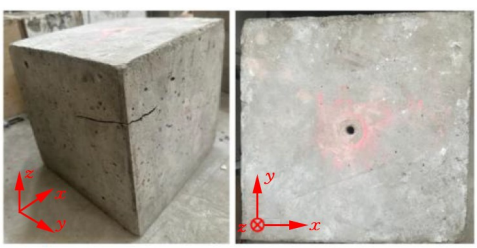
Fig.5　True triaxial hydraulic fracturing test system

真三轴水力压裂加载系统采用四柱式框架结构,通过2个侧面油缸对试样侧面施加压力,实现对σ_H、σ_h方向的压力控制。将最小主应力σ_h以静水压力形式施加于测试室中的岩石夹紧装置,以此调控水力压裂测试的应力环境。压裂系统通过向钻孔注入高压流体模拟水力压裂过程,并实时监控压力与流量变化。

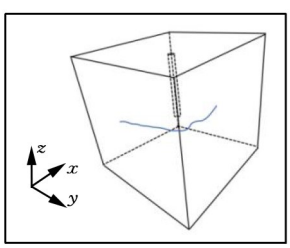
2 水力压裂试验结果与分析

2.1 水力压裂岩样裂缝破坏形态分析

图6为方案一岩石试件水力压裂试验。图6(a)为1号试样加载破裂形态,因最大主应力与中间主应力的差值较小,在二者的共同作用下,岩石内部裂缝产生分叉现象。裂缝穿透岩石层理并沿层理扩展,裂缝面近似垂直于σ_v方向。图6(b)为1号试样裂缝形态,可见裂缝呈单侧优势扩展特征,且裂缝为非对称的扩展模式。水力裂缝的扩展遵循最小阻力原则,当一侧扩展阻力较小时,裂缝更易向阻力更小的方向扩展。方案一加载过程中,因试样尺寸较小,压裂液可在短时间内抵达预定边界,而裂缝的另一侧未得到充分扩展,因此裂缝形态呈现非对称的特征。



(a)1号试样加载破裂

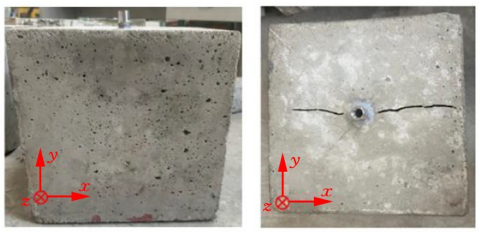


(b)1号试样裂缝形态

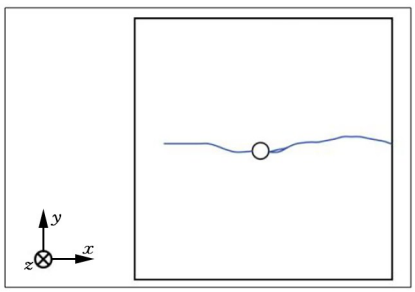
图6 方案一岩石试件水力压裂试验

Fig.6 Hydraulic fracturing experiment on rock specimens-scheme 1

图7为方案二岩石试件水力压裂试验。图7(a)为2号试样加载破裂形态,裂缝表面呈凹凸不平的特征,整体平整度较差。宏观来看,裂缝主要在水平面内扩展,且从中心孔起裂并向外延伸。图7(b)为2号试样裂缝形态,可见试样产生的裂缝形态呈双翼状,且沿水平方向近似对称,裂缝形态较为平缓,扩展过程无明显拐角。



(a)2号试样加载破裂

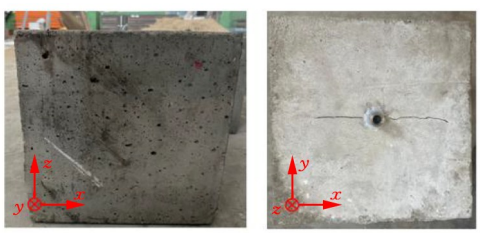


(b)2号试样裂缝形态

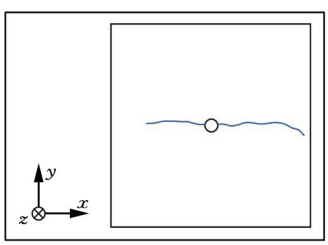
图7 方案二岩石试件水力压裂试验

Fig.7 Hydraulic fracturing experiment on rock specimens-scheme 2

图8为方案三岩石试件水力压裂试验。图8(a)为3号试样加载破裂形态,断裂面均垂直于σ_h,平行于σ_H。压裂裂缝形态多为椭圆形,且压裂裂缝对岩石非均质性与应力不均匀性更敏感,易发育不规则裂缝。图8(b)为3号试样裂缝形态,裂缝形态与2号试样基本一致,无明显突变。这表明在均质性较好的岩石中,水力压裂裂缝形态较为平缓。



(a)3号试样加载破裂



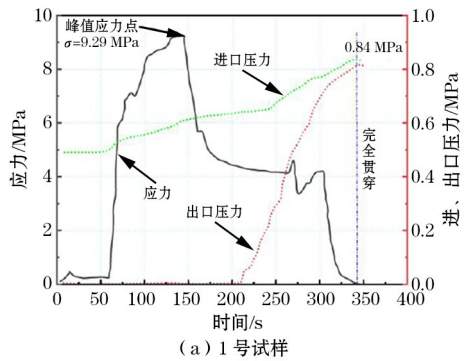
(b)3号试样裂缝形态

图8 方案三岩石试件水力压裂试验

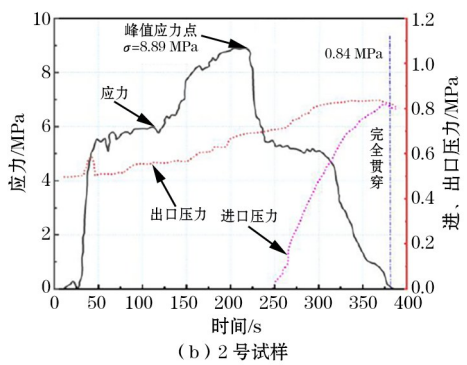
Fig.8 Hydraulic fracturing experiment on rock specimens-scheme 3

2.2 水力压裂压力变化规律

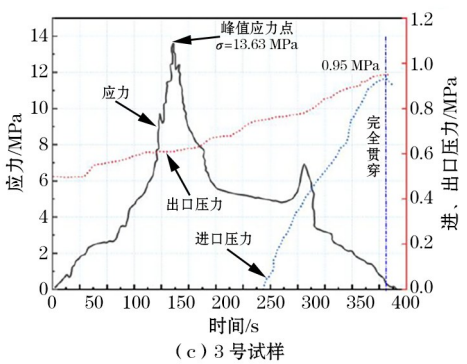
图 9 为不同方案下水力压裂压力变化规律曲线。试验开始时,向进气管中注入 0.5 MPa 惰性气体(氦气),并同时采用注液泵与压裂泵向岩体注入压裂液,使岩体在压裂液连续注入过程中实现裂隙贯通。



(a) 1 号试样



(b) 2 号试样



(c) 3 号试样

图 9 水力压裂压力变化规律

Fig.9 Variation of hydraulic fracturing pressure

由图 9(a)可知,岩体在连续注入压裂液过程中,前 60 s 内压裂压力均低于 1 MPa,随压力持续施加,在 130 s 左右起裂压力达到峰值 9.29 MPa,随后压裂压力迅速下降,表明当压裂压力达到 9.29 MPa 时,岩石内部裂缝迅速扩张发育,形成宏观裂缝。理论起裂压力与实测值基本吻合;试验初始阶段,气体进口压力升高,出口压力仅缓慢小幅度增加;在压裂液连续注入过程中,随孔隙水压的升高,压裂压力逐步上升,出口压力的增幅较小;随注水量增加,岩样裂缝完全贯通,进口压力先缓慢上升后缓慢下降,出口压力则快速升高,当压力稳定后,进口与出口压力趋于一致,表明岩样进出口裂缝完全贯通,水力压裂结束。

图 9(b)、图 9(c)的压裂压力变化与图 9(a)基本一致。其中,图 9(b)压裂压力峰值为 8.89 MPa,图 9(c)压裂压力峰值为 13.63 MPa,压裂压力达到峰值后迅速下降。由压裂液扩散范围可知,压裂液沿压裂管柱方向进入岩石,并以椭圆形向最大水平主应力方向扩展;其长轴与主应力方向一致,短轴与中间应力方向一致,椭圆圆心位于压裂管轴向位置。

2.3 声发射信号参数特征分析

图 10(a)为 1 号试样破裂压力及声发射信号监测结果。由图 10(a)可知,随压裂应力升高至破裂压力,水力裂缝开始起裂,声发射事件数增加且幅值同步增大,表明岩样内部损伤活动加剧,且损伤源的能量和释放强度均有所增加。水泥砂浆试样破裂瞬间,AE 信号显著活跃,高频声发射信号增多,冲击次数明显增加,声发射幅值达到最大 83.2 dB,事件数为 4 165 个。随后压裂液压力骤降并保持稳定,直到裂缝贯通岩样表面。

图 10(b)为 2 号试样破裂压力及声发射信号监测结果。由图 10(b)可知,某一时刻声发射事件数增加且幅值同时上升,表明岩样内部正发生剧烈损伤破坏,且损伤源的释放强度与能量均有所增强。声发射事件数增加表明岩样内部有更多的损伤活动发生,这是由压裂压力升高与微裂纹的萌生拓展所致,本次声发射事件数为 3 698 个。声发射幅值峰值为 94.5 dB,幅值上升进一步反映了损伤活动的释放强度与能量均在提升,即岩样内部损伤源释放的能量更多,产生的声发射信号更强。

图 10(c)为 3 号试样破裂压力及声发射信号监测结果。由图 10(c)可知,随着起裂压力的升高,声发射事件数和幅值均呈显著增长趋势,声发射事件数为 4 702 个,声发射幅值峰值为 121.1 dB。

对比 3 组试验结果可知,恒流量水力压裂试验中,高幅值声发射信号主要出现在水泥砂浆试样破裂瞬间。对比 2 号、3 号试样,从声发射信号特征来看,随围压升高,声发射事件数增幅为 27.15%,声发射幅值增幅为 28.15%,增幅显著。

岩石破裂前,声发射事件数通常呈现显著增加趋势。由于岩体内部损伤与裂纹不断扩展,更多能量被释放并转化为声波信号。声发射事件数增加可作为岩体结构性能劣化的显著标志。

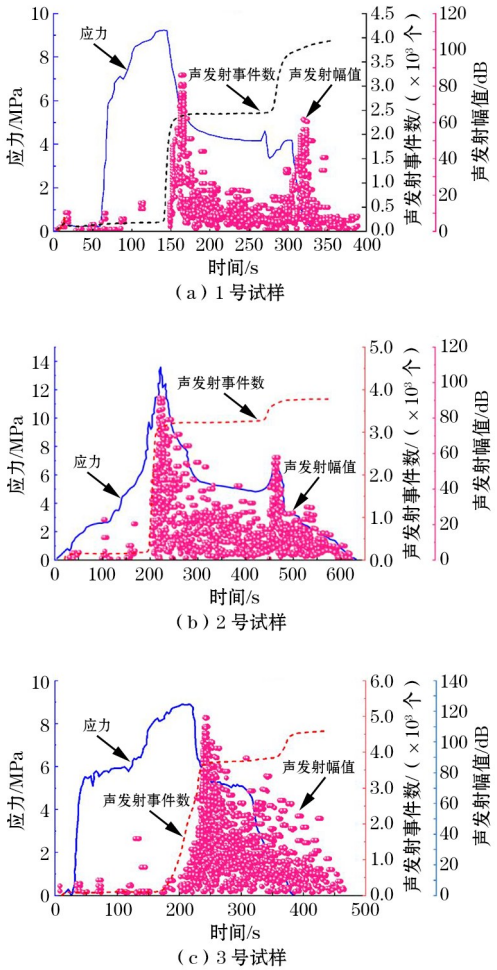


图 10 试样破裂压力及声发射信号

Fig.10 Fracture pressure and acoustic emission signals of specimens

同时,声发射幅值变化也是预测岩体破裂的重要前兆。岩体破裂前,幅值可能呈现先上升后下降的变化过程。初始阶段,随岩体损伤加剧,能量释放量增加,导致幅值上升。但接近破裂峰值时,岩体结构承载能力骤降,能量释放呈非连续、非稳定状态,进而导致幅值下降。

2.4 声发射时空分布特征分析

采用声发射定位技术处理监测的声发射信号,可确定水泥砂浆试样内部破裂源位置,进而揭示裂缝起裂与扩展的空间分布特征。

采用时差分析法处理 1 号试样同步声发射监测数据,得到加载全过程的声发射定位如图 11 所示。由图 11 可知,水力压裂后试样内部出现大量声发射点,表明试样内部发育大量复杂微裂纹。采用三维点图拟合水力压裂宏观裂缝,发现声发射点主要集中在水力压裂裂缝周边。由图 11(b)可知,声发射定位点主要集中在钻孔周边,分布范围近似"圆形",且主要分布在钻孔周围 30～200 mm 范围内。1 号试样裂缝呈单侧优势扩展特征,声发射定位点也呈现出相同的分布特征。

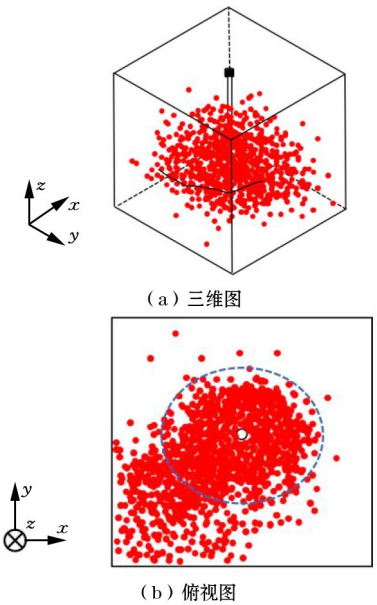


图 11 1 号试样破裂声发射定位

Fig.11 Acoustic emission localization of the rupture of specimen 1

图 12 为 2 号试样破裂声发射定位图,2 号试样裂缝呈双翼状,且沿水平方向近似对称,裂缝形态较为平缓,声发射定位结果反映了宏观裂纹形成前,岩体内部微观破裂的演化机制。

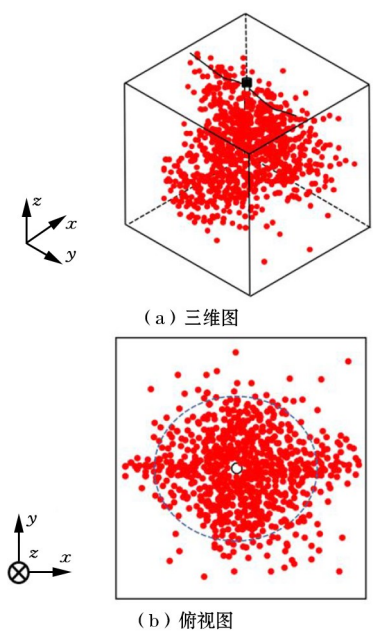
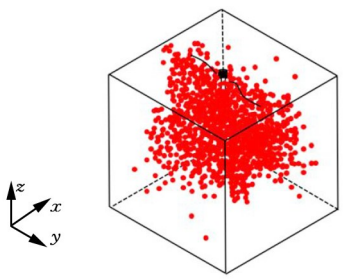


图 12 2 号试样破裂声发射定位

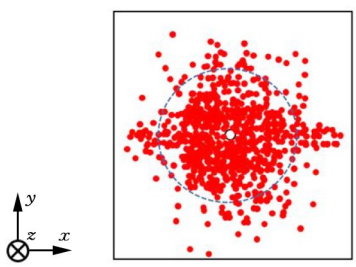
Fig.12 Acoustic emission localization of the rupture of specimen 2

图 13 为 3 号试样破裂声发射定位。3 号试样的破裂形态与 2 号试样基本一致,均呈对称双翼状。在此基础上,结合水力压裂全过程的声发射空间分布数据与宏观裂缝形态,可见试样内部存在大量的声发射信号,且在水压主导的裂缝表面分布大量的声发射定位点。

在水力压裂过程中,不仅在试样的主缝处形成宏观压裂主缝面,且沿主缝面两侧发育复杂致密的裂缝网络。声发射空间定位结果为整个岩体失稳过程的监测数据,具有显著前兆意义。



(a) 三维图



(b) 俯视图

图 13 3 号试样破裂声发射定位

Fig.13 Acoustic emission localization of the rupture of specimen 3

3 水力压裂裂缝扩展数值模拟研究

3.1 XSite 软件计算原理

XSite 软件采用显式数值分析方法,用于计算结构面张开、闭合以及剪切滑移等非线性力学特性。通过修正传统弹塑性本构理论,建立适用于工程应用的有限元分析模型,并与试验结果进行对比验证,证实了模型的有效性。该模型包含 3 个平动自由度和 3 个转动自由度,采用线性动量平衡方程及位移与速度关系估算节点平动自由度。计算方程如下:

$$\dot{u}_i^{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{u}_i^{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \sum F_i^t \frac{\Delta t}{m} \tag{4}$$

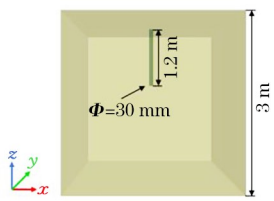
$$u_i^{(t+\Delta t)} = u_i^t + \dot{u}_i^{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} \Delta t \tag{5}$$

式中:$\dot{u}_i^t$ 为节点 i 分量在 t 时刻的速度,m/s,其中,$i=1,2,3$;$\sum F_i^t$ 为 t 时刻作用在节点上的所有 i 分量的合力,N;Δt 为计算时间步长,s;m 为节点的质量,kg;u_i^t 为节点 i 分量在 t 时刻的位移,m。

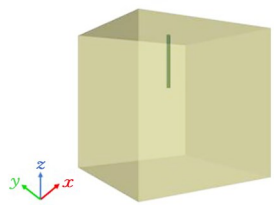
3.2 模型的建立与参数选取

图 14 为钻孔压裂基础模型示意,模型尺寸为 3 m×3 m×3 m,中心布置垂直钻孔,钻孔长度为 1.2 m,半径为 30 mm。模型与现场实际比例 1∶10,应力场方案见表 3。注水量为 0.001 m^3/s。

工作面基本顶岩石力学参数见表 5。依据工作面基本顶岩石力学性质,设定钻孔压裂基础模型参数。



(a) 基础模型正视图



(b) 基础模型侧视图

图 14 钻孔压裂基础模型示意

Fig.14 Schematic of the basic drilling and fracturing model

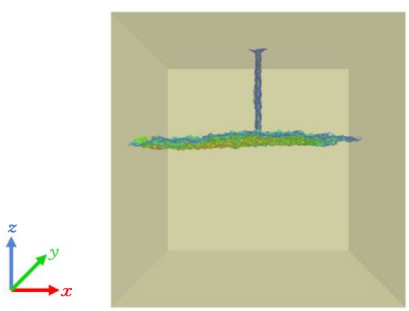
表 5 工作面基本顶岩石力学参数

Table 5 Rock mechanical parameters of basis roof in working face

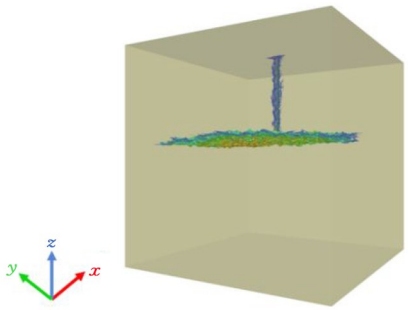
模型	单向抗压强度/MPa	单向抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1	86.72	7.29	25.97	0.21
2	81.81	7.14	27.29	0.23
3	87.22	8.02	25.68	0.18
平均值	85.25	7.48	26.31	0.21

3.3 应力对水力裂缝三维扩展特征的影响

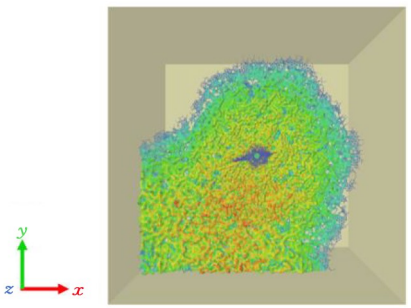
图 15 为钻孔压裂 1 号模型数值模拟结果,裂缝形态近似椭圆,以钻孔为中心,在水平面内展布,大致垂直于 σ_v 方向。对照前文水力压裂现场实物图,分析表明,压裂裂缝主扩展方向基本一致,形态相似。水力压裂过程中,高压流体作用于孔壁,二维理论分析表明,裂缝沿着与压应力垂直的方向扩展。图 15 直观呈现了孔洞位置的裂缝扩展特征。



(a) 正视图



(b) 侧视图

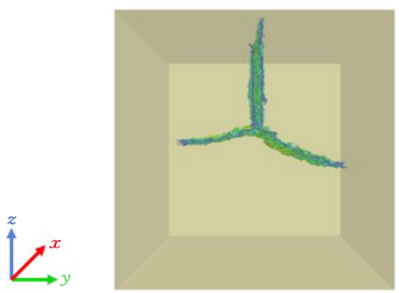


(c) 俯视图

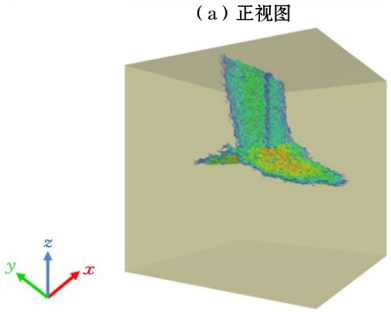
图 15 1 号模型裂缝三维扩展形态

Fig.15 Three-dimensional crack propagation morphology of model 1

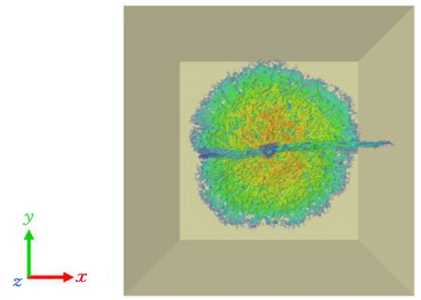
图 16 为钻孔压裂 2 号模型数值模拟结果,压裂裂缝自钻孔底部斜向两侧延伸,在模型内形成一条高裂脊,如图 16(a)所示,压裂形态呈“人”字形,裂脊位于模型侧向中部。“人”字形水力压裂是指裂脊两侧斜裂缝面上部岩体受轴向应力作用,易沿斜面发生滑移并产生压应变,导致裂脊上方岩体发生应力集中,持续加载下沿裂脊方向产生拉裂,扩展至上部岩体后形成两个较大的岩块。



(a) 正视图



(b) 侧视图

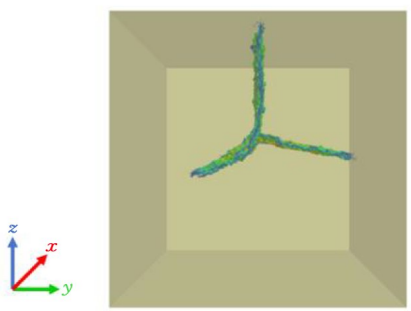


(c) 俯视图

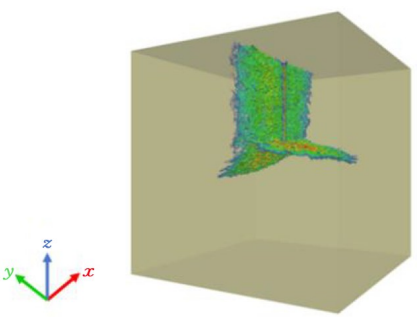
图 16 2 号模型裂缝三维扩展形态

Fig.16 Three-dimensional crack propagation morphology of model 2

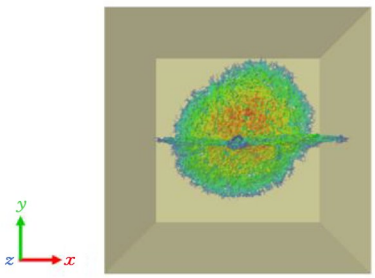
图 17 为 3 号模型裂缝三维扩展形态图,水力裂缝从注水钻孔的底部向周边发育,平行于最大主应力 σ_H 方向,水力压裂裂缝存在一条裂缝脊,两侧裂缝与 σ_h 方向呈小角度倾斜,压裂裂缝整体呈“人”字形,将模型划分为上小、下大两部分。裂脊处发育出垂直的新裂缝,其原因是裂脊两侧斜向裂缝面使岩石沿裂缝方向滑移,在裂脊处直接形成张拉断裂,并在持续荷载作用下,裂缝延伸到模型顶部。对比压裂两侧倾斜面的高度可知,右侧压裂面略高于左侧,且更平缓,这导致左侧岩体滑移趋势更为显著,右侧岩石的垂向应力更高,破裂程度更严重,这是因为右侧岩石受垂向压力更大,进而使模型在该区域的破裂更明显。



(a) 正视图



(b) 侧视图



(c)俯视图

图 17 3 号模型裂缝三维扩展形态

Fig.17 Three-dimensional crack propagation morphology of model 3

3.4 应力对水力裂缝面积的影响

基于模拟结果绘制模型裂缝面积和注水压力随时间的变化曲线,如图 18 所示,可直观获取裂缝破裂时的注水压力值。因垂向应力 σ_v 恒定,对比分析 3 组模型结果发现,水平应力差可影响裂缝面积与注水压力大小。水平应力差较小时,水力裂缝总面积通常较大。原因是低应力差下,裂缝扩展阻力较小,裂缝更易形成和延伸,裂缝面积会随之增大。当水平应力差增加至一定阈值时,水力裂缝扩展阻力增大,扩展受到限制。因此,高水平应力差下,裂缝总面积减小。

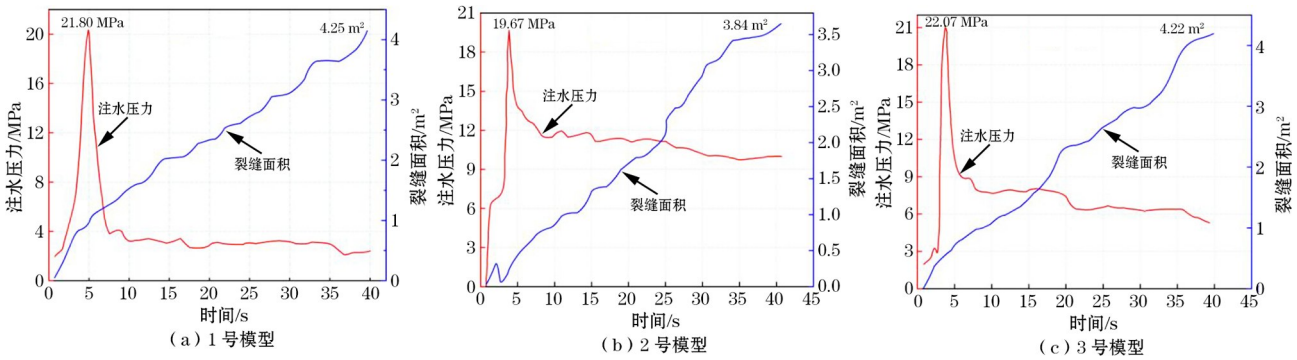


图 18 模型裂缝面积和注水压力随时间的变化曲线

Fig.18 Variation curves of model crack area and injection pressure with time

水平应力差还会影响岩体的渗透性。高水平应力差下,岩体中的裂缝和孔隙结构更为复杂,会增大水在地层中的流动阻力,导致注水难度增大,需更高的注水压力来克服该阻力。反之,低水平应力差下,岩体的渗透性相对较好,压裂液更易渗透流动,所需的注水压力相对较低。

4 工程案例分析

宽沟煤矿 I010206 工作面上方发育有细粒砂岩与中粒砂岩组合岩层,抗压强度最大可达 114.35 MPa,为典型的缓倾斜坚硬顶板。工作面在回采过程中,随采空区面积扩大,上方顶板极易形成大面积悬顶,当悬顶面积达到承载极限而突然垮落时,会诱发强矿压(冲击地压)动力灾害。针对该问题,提出定向长钻孔分段水力压裂治理方案。基于水力压裂裂缝面积演化规律及模拟结果,方案设计 1 个钻场、3 个压裂钻孔。方案具体设计内容:单孔长度 481～517 m,单孔设计压裂 13～14 段,累计钻探长度 1 500 m,设计压裂段数 40 段。钻孔设计平面如图 19 所示。

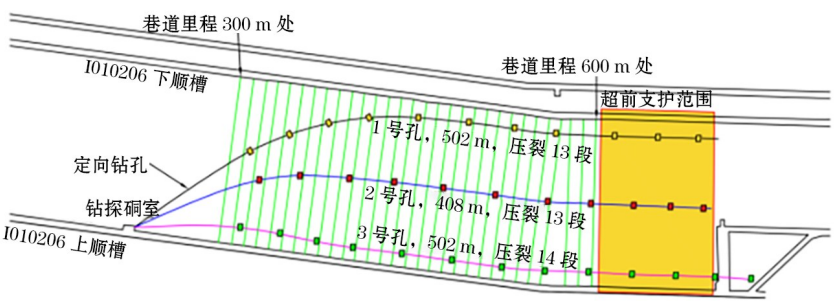


图 19 压裂钻孔设计平面

Fig.19 Plan view of fracturing well design

图 20 为 1 号孔第 5 段水力压裂全过程应力曲线,可见随着压裂应力升高至 20.5 MPa,围岩应力

降低,表明 20.5 MPa 为围岩破裂压力,水力裂缝开始起裂,这与前文所确定的最低施工压力标准(16.79 MPa)相吻合。同时,围岩在水力压裂的持续作用下,压裂曲线呈起伏波动特征,但水力压裂应力均值稳定在13.23 MPa 左右,进一步验证了试验确定的水力压裂压力范围值的准确性。此外,水力压裂初期,围岩内部裂缝迅速扩张,发育成宏观裂缝。随注水量增加,围岩裂缝完全贯通,进口压力先缓慢上升后缓慢下降,该变化规律与前文分析基本一致,表明试验理论可有效指导现场工程实践。

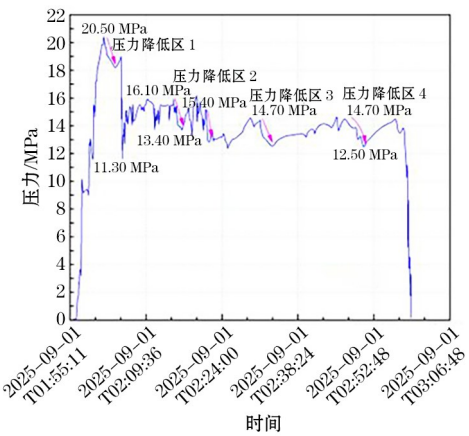


图 20 1 号孔第 5 段压力曲线

Fig.20 Pressure curve of segment 5 of hole 1

5 结论

(1) 通过真三轴水力压裂试验与数值模拟研究,揭示了不同水平应力差对裂缝扩展形态的显著影响:低水平应力差下裂缝呈现单侧优势扩展,面积较大;高应力差下裂缝趋于对称双翼状,扩展阻力增大,面积受限。裂缝主扩展方向与最大水平主应力垂直,验证了基尔施方程的理论预测,其形态受岩石非均质性与应力状态的协同控制。

(2) 声发射事件数、幅值及空间分布与裂缝起裂、扩展过程高度相关。试验表明,裂缝起裂瞬间声发射信号幅值达到峰值(83.2～121.1 dB),事件数显著增加(3 698～4 702 个),且定位点集中分布于裂缝周边。声发射时空演化特征可有效表征岩石内部损伤累积与宏观破裂的临界状态,为压裂过程实时监测与破坏预警提供依据。

(3) 结合试验与数值模拟结果,确定了宽沟煤矿坚硬顶板水力压裂的临界起裂压力范围为 10.80～16.79 MPa,建议最低施工压力取 16.79 MPa,以保障工程安全。工程案例验证表明,定向长钻孔分段压裂方案(单孔压裂 13～14 段)可显著减小悬顶面积、降低冲击地压风险,压裂压力曲线与试验规律一致,证实了理论模型的工程适用性。

参考文献(References):

[1] 李铁,蔡美峰,王金安,等.深部开采冲击地压与瓦斯的相关性探讨[J].煤炭学报,2005(5):20-25.
Li Tie, Cai Meifeng, Wang Jin'an, et al. Discussion on relativity between rockburst and gas in deep exploitation[J]. Journal of China Coal Society,2005(5):20-25.

[2] 崔峰,贾冲,来兴平,等.近距离强冲击倾向性煤层上行开采覆岩结构演化特征及其稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):507-521.
Cui Feng, Jia Chong, Lai Xingping, et al. Study on the evolution characteristics and stability of overburden structure in upward mining of short distance coal seams with strong burst tendency [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 507-521.

[3] 张建民,李全生,张勇,等.煤炭深部开采界定及采动响应分析[J].煤炭学报,2019,44(5):1314-1325.
Zhang Jianmin, Li Quansheng, Zhang Yong, et al. Definition of deep coal mining and response analysis[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(5):1314-1325.

[4] 康红普,张晓,王东攀,等.无煤柱开采围岩控制技术及应用[J].煤炭学报,2022,47(1):16-44.
Kang Hongpu, Zhang Xiao, Wang Dongpan, et al. Strata control technology and applications of non-pillar coal mining [J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):16-44.

[5] 徐世烺.混凝土断裂力学研究[M].大连:大连理工大学出版社,1991.
Xu Shilang. Fracture mechanics of concrete[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press,1991.

[6] 李世愚.岩石断裂力学[M].北京:科学出版社,2016.
Li Shiyu. Rock fracture mechanics[M]. Beijing: Science Press,2016.

[7] 王小琼,宋嘉欣,刘卫华,等.页岩水力压裂物理模拟实验及声发射特征研究[J].地球物理学报,2025,68(1):229-243.
Wang Xiaoqiong, Song Jiaxin, Liu Weihua, et al. Experimental study on hydraulic fracturing and acoustic emission characteristics of shale[J]. Chinese Journal of Geophysics,2025,68(1):229-243.

[8] 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.

[9] 王佳澍,王琳琳.基于核磁共振技术的水力压裂孔隙结构演化特征[J].科学技术与工程,2024,24(30):12943-12950.
Wang Jiashu, Wang Linlin. Evolution characteristics of hydraulic fracturing pore structure based on nuclear magnetic resonance [J]. Science Technology and Engineering,2024,24(30):12943-12950.

[10] 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+1159
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+1159.

[11] 邓广哲,王斌辉.煤岩介质对水压裂隙扩展的影响机理[J].西安科技大学学报,2024,44(1):12-22.
Deng Guangzhe, Wang Binhui. Influence mechanism of coal and rock medium on hydraulic fracture propagation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024,44(1):12-22.

[12] 吕茂淋,朱珍德,周露明,等.基于相场法的预制双裂隙岩体水力压裂扩展数值模拟研究[J].岩土力学,2024,45(6):1850-1862.
Lyu Maolin, Zhu Zhende, Zhou Luming, et al. Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in rock masses with pre-existing double fractures using the phase field method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(6):1850-1862.

[13] 吕玉磊,郑凯歌,白俊杰.顶板定向长钻孔分段水力压裂防冲技术研究[J].煤炭工程,2022,54(10):68-74.
Lyu Yulei, Zheng Kaige, Bai Junjie. Rockburst prevention technology of directional long drilling segmented hydraulic fracturing in roof[J].Coal Engineering,2022,54(10):68-74.

[14] 石垚,雷瀚,杨新路,等.煤矿坚硬顶板灾害水力压裂防治技术监测及评估[J].煤炭工程,2024,56(2):122-130.
Shi Yao, Lei Han, Yang Xinlu, et al. Monitoring and evaluation of hydraulic fracturing prevention and control technology for hard roof disaster in coal mine[J]. Coal Engineering,2024,56(2):122-130.

[15] 林志斌,李亚超,吴疆宇,等.水力压裂对末采矿压显现规律的影响研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(4):714-721.
Lin Zhibin, Li Yachao, Wu Jiangyu, et al. Influence of hydraulic fracturing on the behavior of mine pressure at the end of mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023,40(4):714-721.

[16] 马玉镇,高永涛,朱斯陶,等.煤矿地面水力压裂防冲机理及效果评价方法[J].煤炭学报,2024,49(11):4390-4405.
Ma Yuzhen, Gao Yongtao, Zhu Sitao, et al. Mechanism and evaluation method of rock burst prevention in coal mines using surface hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(11):4390-4405.

[17] 钟坤,陈卫忠,赵武胜,等.煤矿坚硬顶板分段水力压裂防冲效果监测与评价[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2582-2593.
Zhong Kun, Chen Weizhong, Zhao Wusheng, et al. Monitoring and evaluation of segmented hydraulic fracturing effect in rock burst prevention on hard roof of coal mine[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(7):2582-2593.

[18] 翁明月,郝英豪,解嘉豪.坚硬煤岩体"钻-切-压"一体化释能减冲技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):84-88.
Weng Mingyue, Hao Yinghao, Xie Jiahao. Study on "drilling-cutting-fracturing" integrated energy dissipation technology for hard coal rock mass[J]. Coal Science and Technology,2019,47(8):84-88.

[19] 王国义,卫强强,宋晓夏,等.太原西山古交区块煤层气井水力压裂效果评价[J].煤炭科学技术,2018,46(6):155-159.
Wang Guoyi, Wei Qiangqiang, Song Xiaoxia, et al. Evaluation of hydraulic fracturing effect of CBM well in Gujiao Area of Taiyuan Xishan Coalfield[J]. Coal Science and Technology,2018,46(6):155-159.

[20] 吴雅琴,邵国良,杨艳磊,等.郑庄区块高煤阶储层直井水力压裂参数评价研究[J].煤炭科学技术,2016,44(9):172-177.
Wu Yaqin, Shao Guoliang, Yang Yanlei, et al. Evaluation study on hydraulic fracturing parameters of vertical well in high ranking coal reservoir of Zhengzhuang Block[J]. Coal Science and Technology,2016,44(9):172-177.