定向长钻孔水力压裂防冲方法及应用研究

卢安良[1],何学秋[1,2],李振雷[1],郑凯歌[3],宋大钊[1,2],周　超[1],周　雨[1],赵志鹏[4]
(1. 北京科技大学 资源与安全工程学院,北京　100083;2. 新疆工程学院 新疆煤矿灾害智能防控与应急重点实验室,新疆 乌鲁木齐　830023;3. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西 西安　710077;
4. 国家能源集团新疆能源化工有限公司 新疆煤炭开采动力灾害防治工程技术研究中心,新疆 乌鲁木齐　830027)

摘要: 长钻孔水力压裂是一种大范围预裂高位坚硬顶板以防治冲击地压的方法,合理的压裂设计及准确的效果评价对防治冲击地压成效至关重要. 本研究基于颗粒流模拟研究了不同因素对水力压裂的影响机制,开发了一个集成裂隙形态和力链退化的双指标水力压裂效果评价模型,通过现场工程应用检验了水力压裂效果和冲击地压防治成效,并总结提出了水力压裂防治冲击地压方法体系. 结果表明:提高注水压力能够显著增强流体驱动裂缝的扩展能力与裂缝网络的复杂程度,减小压裂钻孔间距与压裂段间距有利于促进裂缝在水平方向和沿钻孔轴向的贯通连通,缩短压裂段长度则有助于集中注水压力,实现更密集和高效的局部压裂. 评价模型进一步揭示水力压裂效果的增加会出现边际递减效应,表现为效果提升幅度随工艺参数优化逐步减缓. 根据该特征设计了水力压裂参数,在宽沟煤矿 206 工作面进行了工程应用. 瞬变电磁法探测表明水力压裂所产生的径向裂纹扩展范围超过 35 m. 与非水力压裂阶段相比,工作面开采的微震事件呈现出高频低能的特征,平均最大能量减少了 43.0%,平均周期来压步距从 28.6 m 降低到 18.5 m,表明顶板完整性和应力释放特性得到显著改善,防治冲击地压取得了良好效果. 本研究建立的水力压裂效果评价方法及防冲方法体系,可为水力压裂的参数优化及防治冲击地压提供理论参考.

关键词: 水力压裂;离散元;效果评价;冲击地压防治
中图分类号: TD 313　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)03-0807-16

Research on the method and application of hydraulic fracturing in directional long borehole to prevent rockburst

LU Anliang[1], HE Xueqiu[1,2], LI Zhenlei[1], ZHENG Kaige[3], SONG Dazhao[1,2], ZHOU Chao[1], ZHOU Yu[1], ZHAO Zhipeng[4]
(1. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Coal Mine Disaster Intelligent Prevention and Emergency Response, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023, China; 3. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China; 4. Xinjiang Engineering Research Center for Prevention and Control of Dynamic Hazards in Coal Mining, CHN Energy Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830027, China)

Abstract: Long borehole hydraulic fracturing is a method of large-scale pre-splitting high-level hard roof to prevent rockburst. Reasonable fracturing design and accurate effect evaluation are very im-

收稿日期: 2025-09-22　　**修回日期:** 2026-01-08　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250388
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3013803);国家自然科学基金项目(52374180,52404112)
第一作者: 卢安良(1996—),男,山东省日照市人,博士研究生. E-mail:d202210066@xs.ustb.edu.cn
通信作者: 李振雷(1988—),男,山东省菏泽市人,教授,博士生导师. E-mail:lizhenlei@ustb.edu.cn
引用格式: 卢安良,何学秋,李振雷,等. 定向长钻孔水力压裂防冲方法及应用研究[J]. 中国矿业大学学报,2026,55(3):807-822.
LU Anliang, HE Xueqiu, LI Zhenlei, et al. Research on the method and application of hydraulic fracturing in directional long borehole to prevent rockburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 807-822.

portant to the effect of rockburst prevention. Based on particle flow simulation, this study studied the influence mechanism of different factors on hydraulic fracturing, developed a double index hydraulic fracturing effect evaluation model integrating fracture morphology and force chain degradation, and verified the hydraulic fracturing effect and rockburst prevention effect through field engineering application, and proposed the hydraulic fracturing prevention and control method system. The results show that increasing the injection pressure can significantly enhance the expansion ability of fluid driven fractures and the complexity of fracture network. Reducing the spacing between fracturing boreholes and fracturing sections is conducive to promoting the connection of fractures in the horizontal direction and along the borehole axis. Shortening the length of fracturing section is conducive to centralizing the injection pressure and achieving more intensive and efficient local fracturing. The evaluation model further reveals that the increase of hydraulic fracturing effect will have a marginal decline effect, which shows that the increase of effect will gradually slow down with the optimization of process parameters. According to this feature, the hydraulic fracturing parameters were designed and applied in 206 working face of Kuangou coal mine. Transient electromagnetic method detection shows that the radial crack propagation range caused by hydraulic fracturing is more than 35 m. compared with the non hydraulic fracturing stage, the microseismic events in the mining face show the characteristics of high frequency and low energy, the average maximum energy is reduced by 43.0%, and the average periodic weighting step is reduced from 28.6 m to 18.5 m, indicating that the roof integrity and stress release characteristics have been significantly improved, and the prevention and control of rockburst has achieved good results. The hydraulic fracturing effect evaluation method and engineering application technology system established in this study can provide a theoretical reference for the optimization of hydraulic fracturing parameters and the prevention and control of rockburst.

Key words: hydraulic fracturing; discrete element numerical simulation; effect evaluation; rockburst prevention and control

冲击地压是最常见、最严重的煤矿动力灾害之一,对煤炭开采作业人员的健康和安全构成重大威胁[1-2]. 近几十年来,众多学者对于冲击地压发生机制开展了大量研究,认为煤矿冲击地压的发生是多种因素综合作用下,动载荷和静载荷叠加的结果[3-4]. 在冲击地压发生的多种因素中,厚硬顶板是引起冲击地压的一项重要因素. 厚层坚硬顶板对冲击地压的控制作用体现在2个方面:一是厚层坚硬顶板力学性能强,更容易在采空区边缘形成悬顶,导致承担的上覆载荷传递到采空区周围的煤岩体中,形成局部高静载应力集中;二是当悬顶长度达到极限垮距时,瞬间发生破断失稳,释放强烈动载荷,增加了冲击地压发生的可能性[5].

顶板型冲击地压防治的核心思路在于通过弱化岩层结构,降低厚层坚硬顶板的完整性[6]. 目前常用的手段主要为深孔爆破[7]. 作为一种有效的主动卸压手段,技术成熟,易于组织,在煤矿中广泛应用. 然而该技术主要针对煤层或煤层上方低位顶板岩层,难以有效缓解高层位的厚硬顶板压力,且只能处理巷道附近的局部区域,卸压范围小. 若处理大范围的工作面,需要布置大量的炮孔,增加了工作量和难度,且难以保证卸压效果. 此外爆破工艺易造成高瓦斯矿井的有害气体超限.

水力压裂技术起初用于石油和天然气开采领域提高渗透性,增加油气产量,同时还应用于地热开采等领域[8-10]. 近年来,随着煤矿冲击地压灾害的频发和水力压裂技术的发展,该技术也逐渐用于坚硬顶板型冲击地压的防治[11]. 从地面或是矿井巷道内施工定向钻孔到需要压裂的目标岩层内,在孔内安装压裂工具后实施水力压裂,顶板发生提前断裂,从而减小顶板悬露的高静载和垮落的高动载,降低工作面开采时的冲击地压危险性[12-13]. 文献[14]分析了煤层坚硬顶板定向水压裂纹转向机制,明确了临界水压与起裂角的影响

规律；文献[15]通过分析应力场和振动场演变特征验证了水力压裂防冲有效性；文献[16]研究了水力压裂预制裂缝可调控远场应力分布，减弱应力叠加效应；文献[17]发现地面水力压裂可将厚硬岩层运动形式调控为回转滑移，显著降低矿震能量；文献[18-19]基于微震监测验证了水力压裂弱化坚硬顶板、控制巷道围岩变形的效果.

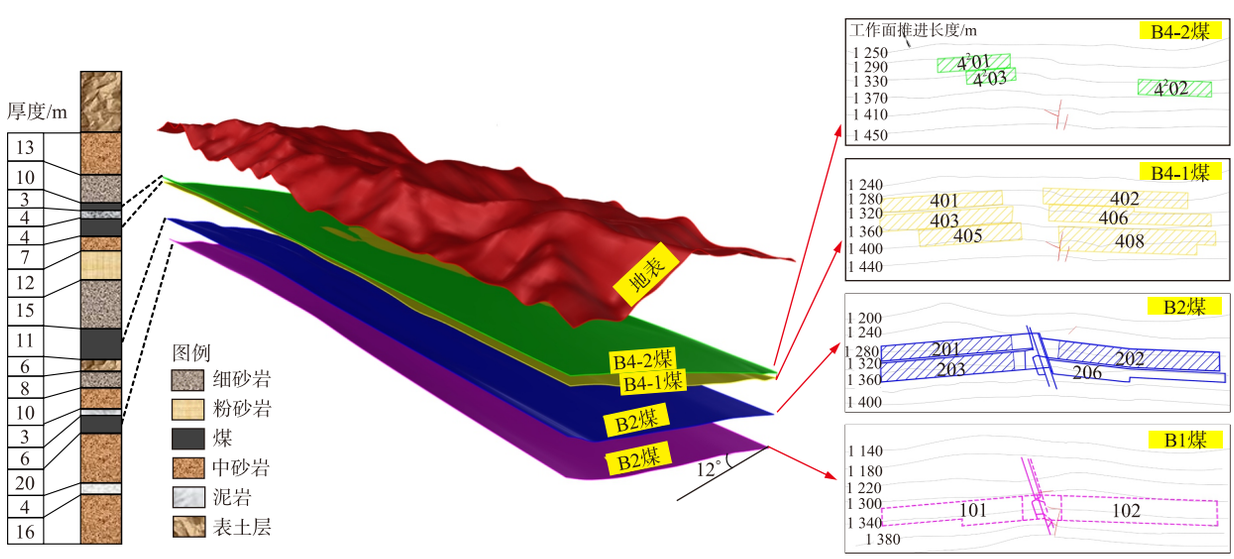
水力压裂进行冲击地压防治的重要内容是效果评价及压裂参数的合理确定. 然而，室内试验与现场试错存在资源消耗，数值模拟为此提供了高效解决方案[20-21]. 其中离散元法可耦合材料宏观力学响应与细观颗粒作用机制，在煤岩破裂及裂隙扩展模拟中具有独特优势，已广泛应用于岩体流固耦合特性研究. 文献[22]发现水力压裂阻断了顶板岩层的应力传递，促使煤柱侧悬顶应力向采空区内转移；文献[23]建立了倾斜厚煤层顶板水力弱化参数优选方法；文献[24]划分了水力裂缝扩展轨迹类型，明确了地应力与岩性的影响；文献[25]得到了拉伸、剪切裂缝数量与压裂孔孔径和注水压力呈正相关；文献[26]从细观尺度发现注液压力增量对起裂压力与起裂时间的反向影响规律. 此外，地应力是裂隙扩展的最重要因素，水力压裂的裂隙扩展方向平行于最大主应力方向[27]. 此外，流体黏度、注水压力、岩石性质、弱面结构等因素也会影响水力压裂的效果[28-30]. 众多学者已针对水力压裂效果影响因素开展了诸多卓有成效的研究，但现有成果多聚焦单一因素的独立作用机制，对注水压力、压裂孔间距、段间距、段长度等多因素耦合下的裂隙演化规律缺乏系统揭示. 同时，水力压裂效果评价多侧重单一维度表征，缺少兼顾细观力学响应与宏观裂隙形态的量化模型，导致工程参数优化仍依赖经验试错，制约了技术的精准应用.

本研究采用颗粒流数值模拟研究了不同因素对水力压裂效果的影响，提出了水力压裂效果的评价模型，确定了工程应用的关键参数，并现场实施检验了水力压裂效果及冲击地压防治成效，构建了水力压裂防治冲击地压的方法体系. 研究结果有望为水力压裂工艺的参数优化及防治冲击地压提供参考.

1　工程概况

1.1　矿井情况

宽沟煤矿位于新疆维吾尔自治区呼图壁县. 矿区地表为起伏的冲沟结构，地表下方的各地层为一单斜构造，平均倾角约为 12°. 可采煤层自上而下共有 4 层，分别为 B4-2，B4-1，B2 和 B1 煤层，赋存较为稳定. 煤层间赋存多层厚硬岩层，如图 1a 所示. 经实验室鉴定，B4-1 煤层和 B1 煤层具有强冲击地压倾向性，B2 煤层顶板和 B1 煤层顶板具有强冲击地压倾向性. 目前，B4-2 和 B4-1 煤层采用走向长壁后退式采煤法，且均已开采完毕. B2 煤层采用走向长壁放顶煤采煤法，最后的 206 工作面正在回采，B1 煤层尚未开采，如图 1b 所示.



(a) 地质构造和煤岩赋存　　(b) 工作面布置

图 1　矿区位置、地质构造和地层特征

Fig. 1　The location, geological structure, and stratigraphic characteristics of the mine site

1.2 工作面开采地质条件

206 工作面为不规则工作面，整体长度约为 1 660 m. 206 工作面开采经历了“扩面”过程，如图 2 所示.“扩面”前，开采长度为 975 m，宽度为 95 m.“扩面”后，工作面开采长度为 685 m，宽度为 136 m. 所开采的 B2 煤层厚度约 11.70 m，深度约为 434.19 m. 206 工作面周围无大型断层褶皱等地质构造，附近最大主应力范围为 12.8～13.9 MPa，最小主应力范围为 5.5～7.37 MPa. 工作面上方赋存多层厚硬砂岩顶板，如图 3 所示. 其中，中粒砂岩层单轴抗压强度平均为 115.25 MPa，厚度为 13.80 m. 中粒砂岩层上方为 12.70 m 的细粒砂岩层，与中粒砂岩层岩性、强度相似，单轴抗压强度平均为 101.32 MPa.

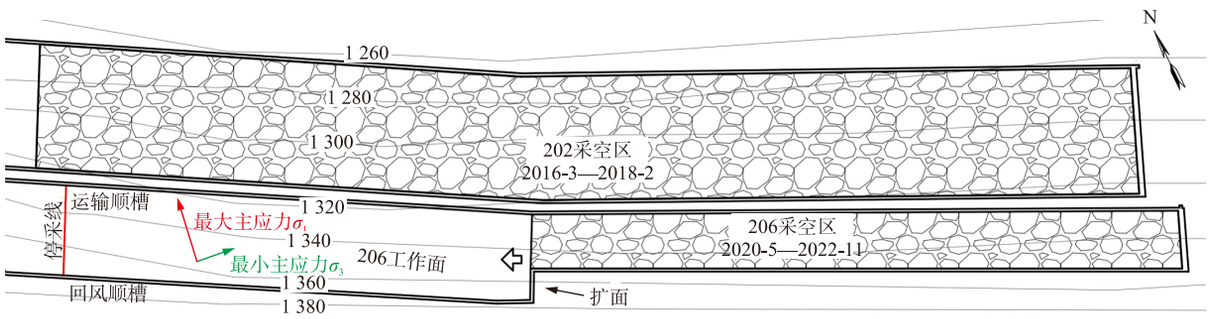
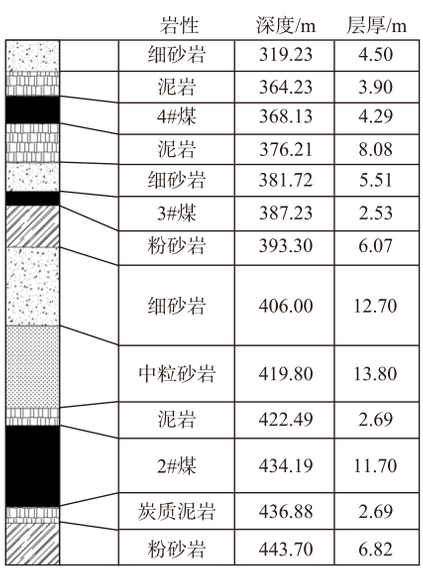


图 2 206 工作面地质及开采情况

Fig. 2 Geological and mining conditions of 206 working face



岩性	深度/m	层厚/m
细砂岩	319.23	4.50
泥岩	364.23	3.90
4#煤	368.13	4.29
泥岩	376.21	8.08
细砂岩	381.72	5.51
3#煤	387.23	2.53
粉砂岩	393.30	6.07
细砂岩	406.00	12.70
中粒砂岩	419.80	13.80
泥岩	422.49	2.69
2#煤	434.19	11.70
炭质泥岩	436.88	2.69
粉砂岩	443.70	6.82

图 3 206 工作面地层钻孔柱状图

Fig. 3 Stratigraphic borehole histogram of 206 working face

206 工作面“扩面”后，计划在工作面布置 3 条长钻孔实施分段水力压裂，促进顶板裂隙发育，降低强度，从而达到防治冲击地压的目的. 煤矿井下的定向长钻孔分段水力压裂工艺如图 4 所示. 首先在顶板坚硬岩层施工定向钻孔，然后将高压钻杆、封隔器、限流器等依次连接，并送入钻孔最深处. 到达第 1 段压裂位置后，开启高压泵注水，限流器两端的胶囊封隔器迅速膨胀并坐封钻孔，高压水从限流器的出水孔内喷射充满钻孔并开始压裂. 完成第 1 段压裂后，压裂工具串整体退出一定距离抵达第 2 压裂段位置开始第 2 段压裂. 重复以上步骤，逐渐完成整个钻孔的压裂. 因此对水力压裂的参数设计至关重要.

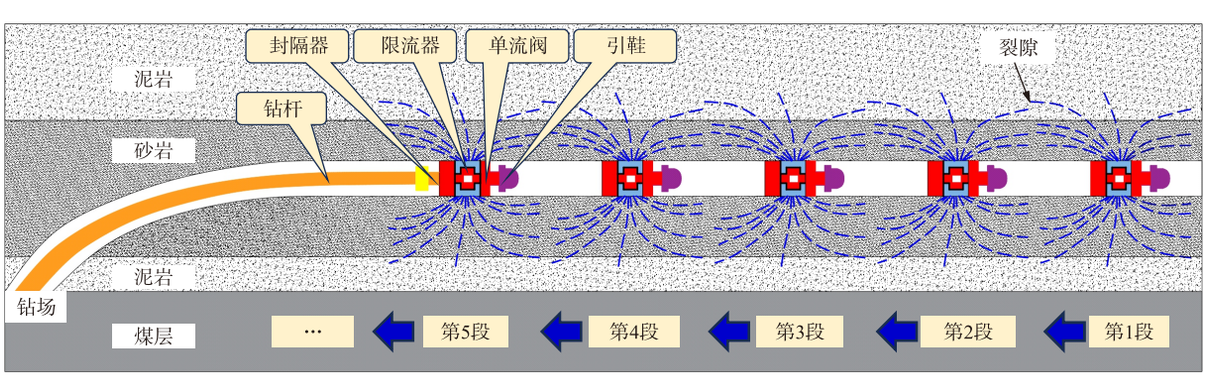


图 4 定向长钻孔分段水力压裂工艺示意

Fig. 4 Schematic diagram of directional long drilling segmented hydraulic fracturing process

2　水力压裂颗粒流数值模拟

2.1　流固耦合原理

PFC 数值模拟通过引入“管-域”模型来进行流固耦合的计算，从而模拟孔隙率较小的固体颗粒间的渗流效果[31]. “管道”是模型中流体的运移通道，“域”是用于储存流体的库，由颗粒接触的连接线所围成的多边形封闭区域，如图 5 所示. 其中，q 为流体流量，a 为“管”的孔径，L 为“管道”长度. 流体流量或压力可以通过“域”连接或“管道”在流域间传递. “域”中流体压力随着耦合计算持续发生改变，产生不同的体积力作用在颗粒表面，促使颗粒产生速度和位移. “管道”和“域”关联起来建立整个渗流网络.

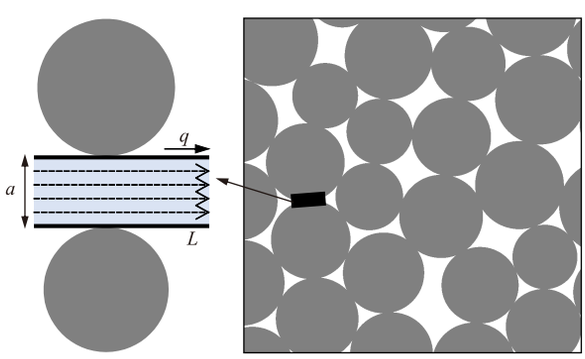


图 5　PFC 颗粒“流域”单元示意

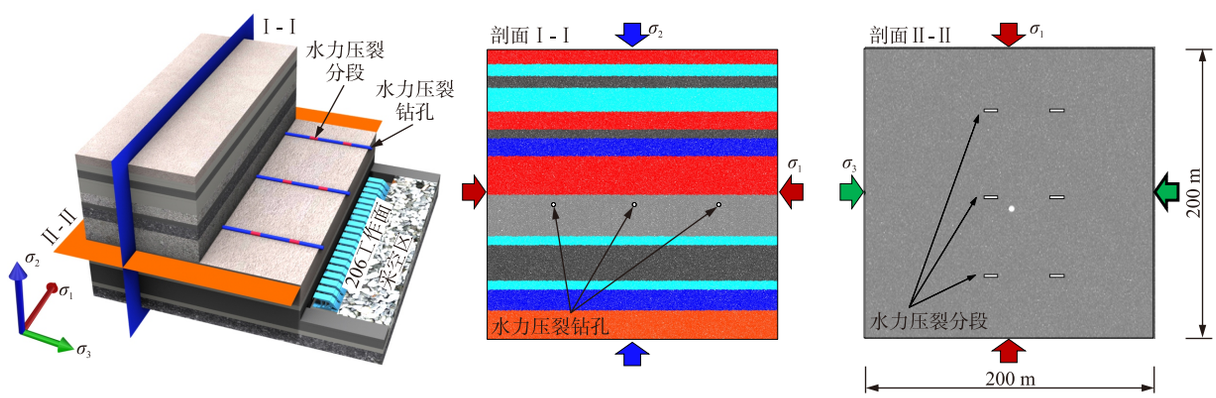
Fig. 5　Schematic diagram of PFC particle "watershed" unit

水力压裂模拟中的最关心的问题之一是水力压裂裂缝扩展过程，这一过程决定了裂纹的扩展方向和裂纹尖端的应力场分布[32]. 裂缝尖端所在区域的压力存储在该区域周围的颗粒中，当压力达到接触键的临界值时，颗粒之间的接触键会被破坏，从而激活连接尖端区域与新区域的“管道”，使孔隙和新孔隙连接，颗粒间黏结断裂，造成水力裂缝扩展，也对应了 PFC 模型中裂缝生成机制. 通过模型中微裂纹的集合来表征试样宏观的裂缝，微裂纹产生的过程就是水力压裂裂缝扩展过程. 本研究采用该模型模拟压裂液渗流-颗粒相互作用-裂隙扩展的全过程，符合水力压裂的物理力学本质.

2.2　模型构建

根据断裂力学破坏准则，在水力压裂过程中，岩体裂纹的起裂条件一般受地应力分布与岩体抗拉强度的共同影响. 对于圆孔的水力压裂，裂纹的扩展方向垂直于最小主应力方向，也即平行于最大主应力方向[33]. 考虑到计算效率及可行性，本文采用PFC2D进行数值模拟.

根据 206 工作面煤岩层实际赋存情况，取图 6a 中的Ⅰ-Ⅰ和Ⅱ-Ⅱ剖面分别建立了 PFC2D 数值模型. 模型长×宽为 200 m×200 m，共有 197 953 个颗粒，如图 6b 和 6c 所示. 水力压裂层位选取在中粒砂岩层. 从Ⅰ-Ⅰ剖面来看，压裂段呈现孔状，从Ⅱ-Ⅱ剖面来看，压裂段呈现长方形状. 因此，图 6b 的模型中创建了压裂圆孔，图 6c 的模型中创建了压裂段，用于模拟压裂液注入压裂的过程. 构建模型后，模型四周被 wall 限制，采用线性接触模型运算至初始平衡. 按照实际地应力情况对模型边界施加围压，通过控制 wall 的移动实现对模型的伺服控制. 图 6 中，σ_1，σ_2，σ_3 分别为最大、中间、最小主应力.



(a) 地层、水力压裂及工作面开采模型　　(b)剖面Ⅰ-Ⅰ数值模型　　(c)剖面Ⅱ-Ⅱ数值模型

图 6　工作面地层及 PFC 水力压裂数值模型构建

Fig. 6　Construction of PFC numerical model for working face formation and hydraulic fracturing

完成上述步骤后，需要改变颗粒间接触为平行黏结接触模型(Linear Parallel Bond Model)，从而模拟岩体的整层特性. PFC 的数值模拟参数不能直接采用实验室测试中获得的力学参数. 然而，

它们可以基于一系列的单轴压缩试验或是拉伸试验进行校准.PFC 模型接触的刚度与弹性模量有关,接触的法向刚度和切向刚度由泊松比决定,试样的强度影响了接触的抗拉强度、内聚力和内摩擦角.通过试错法,对试样的力学参数进行了校准,得到微观力学参数如表 1 和表 2 所示.

表 1 数值模拟细观力学参数

Table 1 Micromechanical parameters of numerical simulation

地层	颗粒半径比	颗粒密度/(kg·m^{-3})	颗粒接触模量/GPa	法向切向刚度比	平行黏结刚度比	颗粒摩擦系数	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa
细砂岩	1.67	2 687	18.5	1.7	2.1	0.25	20.1	34.0
中砂岩	1.67	2 666	15.1	1.8	1.9	0.25	23.2	48.5
泥岩	1.67	2 658	13.8	1.6	1.8	0.25	16.2	29.6
粉砂岩	1.67	2 640	16.2	1.9	1.8	0.25	21.2	44.5
B4/B3 煤层	1.67	1 379	5.2	1.2	1.3	0.25	4.5	15.3
B2 煤层	1.67	1 511	6.5	1.3	1.6	0.25	5.8	18.5

表 2 水力压裂流域力学参数

Table 2 Mechanical parameters of hydraulic fracturing watershed

参数	流体体积模量/GPa	流体动力黏度系数/(Pa·s)	渗透率/mD	注入速率/(m^3·min^{-1})	注液量/m^3
取值	10	0.3	0.1	5	40

2.3 模拟方案

由于不可能将所有因素都全部考虑到,在本研究中采用灵敏度分析方法,以恒定流体速率和流量通过注入孔施加水压,主要关注注水压力、压裂孔间距、压裂段间距和压裂段长度等因素对裂缝扩展的影响.其中注水压力是控制裂隙扩展能力的核心因素[14,25],现场实践证实压裂孔与段间距直接影响裂隙贯通效果,压裂段长度对压力集中程度起关键作用[34].模拟方案的因素选取具有明确的学术与工程依据.因此,聚焦上述 4 类因素,分别探讨各因素下的水力压裂效果,为水力压裂防治冲击地压的工程应用提供参数依据.数值模拟方案如表 3 所示.

表 3 数值模拟方案

Table 3 Numerical simulation scheme

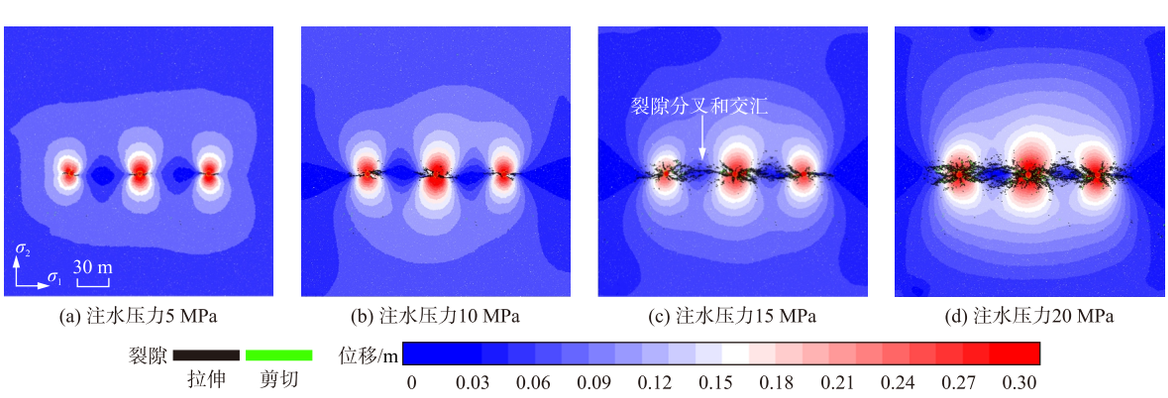
参数	注水压力/MPa	压裂孔间距/m	压裂段间距/m	压裂段长度/m
取值	5,10,15,20	40,50,60,70	20,30,40,50	5,10,15,20

3 不同因素影响下水力压裂效果及预评价

3.1 水力压裂裂隙扩展规律

3.1.1 注水压力

图 7 为压裂孔间距 50 m,注水压力分别为 5,10,15 和 20 MPa 条件下裂隙扩展和煤岩体的位移云图.整体来看,受构造应力的影响,以拉伸类型为主的裂隙呈现水平方向扩展.裂隙的扩展长度随着注入压力的增大而增大,造成纵向位移的增加.岩体最大位移出现在注水孔周围,位移呈现以注水孔为中心的纵向对称递减的特征.



(a) 注水压力5 MPa (b) 注水压力10 MPa (c) 注水压力15 MPa (d) 注水压力20 MPa

图 7 不同注水压力的水力压裂效果

Fig. 7 Hydraulic fracturing effects under different water injection pressures

注入压力较低时，裂隙长度较短，且数量单一．高压促进主裂缝更长距离的扩展，诱导更多次生分支裂隙产生和相互交叉连接，形成更复杂、范围更广的裂隙网络．同时，高压造成岩体挤压导致岩体位移增大，更大程度降低岩体完整性和强度．注水压力大于 15 MPa 时，压裂孔间的复杂裂隙网络逐渐贯通，岩体的完整性得到进一步的破坏，产生了较好的压裂效果．

3.1.2　压裂孔间距

前一节研究得出，注水压力大于 15 MPa 时，岩体内会出现明显的裂隙网络，有助于降低岩体的强度．图 8 分别为注入压力 15 和 20 MPa 情况下，压裂孔间距分别为 40，50，60 和 70 m 条件下裂隙扩展和煤岩体的位移云图，其中图 8a1～8a4 为注水压力 15 MPa 工况，图 8b1～8b4 为注水压力 20 MPa 工况．

2 类压力工况下，压裂孔间距越小，孔间的裂隙网络贯通，岩体破碎程度越高，孔间的岩体位移越大．较小的间距缩短了相邻压裂点之间的物理距离，这使得单个孔形成的裂隙扩展区更容易重叠交汇．裂隙扩展过程中更易连接贯通，促进在更大空间范围内形成裂隙网络结构，紧密的间距显著增强岩体的整体破碎程度和位移连续性．

注水压力为 20 MPa 在低孔间距下增强了流体驱动裂缝的扩展能力，增加了裂隙分支数量和孔间位移，如图 8b1～8b4．随着压裂孔间距增加，这种增强作用逐渐削弱，无法有效改善孔间裂隙的贯通性，水力压裂效果提升逐渐减小，如图 8b3～8b4．钻孔间距大于 60 m 时，孔间的岩体裂隙网络不再贯通，钻孔间的岩体位移也随之减小．

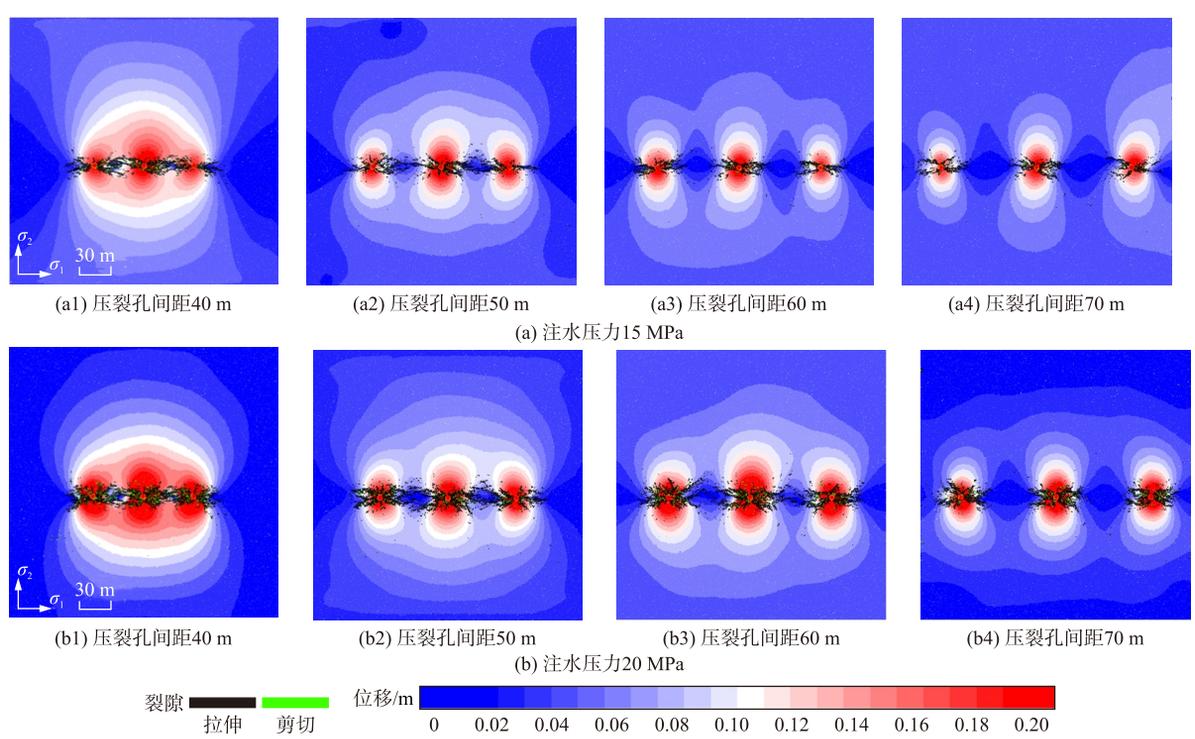


图 8　不同压裂孔间距的水力压裂效果

Fig. 8　Hydraulic fracturing effect with different spacing between fracturing holes

3.1.3　压裂段间距

继续开展了注入压力为 15 MPa、压裂孔间距为 50 m、压裂段长度为 15 m 条件下的水力压裂模拟，裂段间距分别被设置为 20，30，40 和 50 m．提取了岩体裂隙扩展和位移云图，如图 9 所示．可以看出，压裂段间距小于 30 m 时，不同压裂段的最大主应力和最小主应力的裂隙网络产生了贯通现象，同时压裂段间的岩体位移增大．

较小的段间距减小了同一钻孔内相邻压裂段之间的距离．类似于减小钻孔间距，它促使同一钻孔不同段产生的裂隙扩展区域紧密相邻甚至重叠．裂隙主要在平行于钻孔轴线方向（也即为最大主应力方向）更容易相互连通，形成沿钻孔方向连续的破裂带，这增强了沿钻孔长度方向的岩体弱化效果．压裂段增加至 40 m 后，压裂段间的最小主应力方向的贯通裂隙网络现象消失．

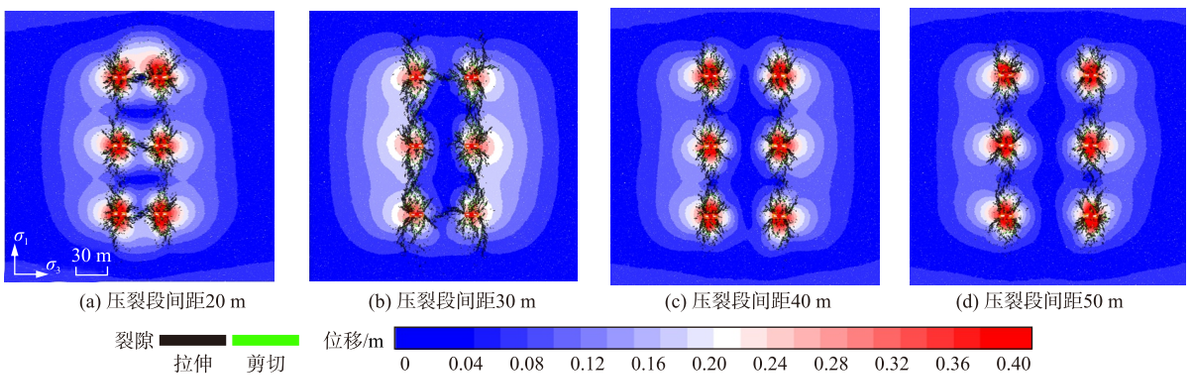


图 9 不同压裂段间距的水力压裂效果

Fig. 9 Hydraulic fracturing effect with different spacing between fracturing sections

3.1.4 压裂段长度

图 10 为注入压力为 15 MPa、压裂孔间距为 50 m、压裂段间距为 30 m 情况下，压裂段长度分别为 5，10，15 和 20 m 条件下的裂隙扩展和煤岩体的位移云图. 压裂段长度的增加未导致裂隙的纵向扩展方向产生明显变化，以受地应力控制的最大主应力方向扩展为主，但是最大主应力方向的裂隙扩展网络范围有所缩小，压裂段之间的裂隙不再发生贯通.

较短的压裂段长度将注入的流体能量和压力更集中作用在更小的轴向范围内. 压裂压力集中导致该段点附近的流体压力更高、作用更强，能更有效地在该局部区域产生密集的多方向裂隙并扩展(尽管主方向仍受地应力控制). 这有利于在局部形成高度破碎区. 此外，压裂段长度的增加，虽然压裂段周围的位移范围增加，却引起了岩体位移变化范围缩小. 过长的压裂段长度导致流体压力分散到更大的轴向范围，使得裂隙扩展的强度和密集程度相对减弱，段内裂隙连通性变差，反而降低了整体的弱化效果.

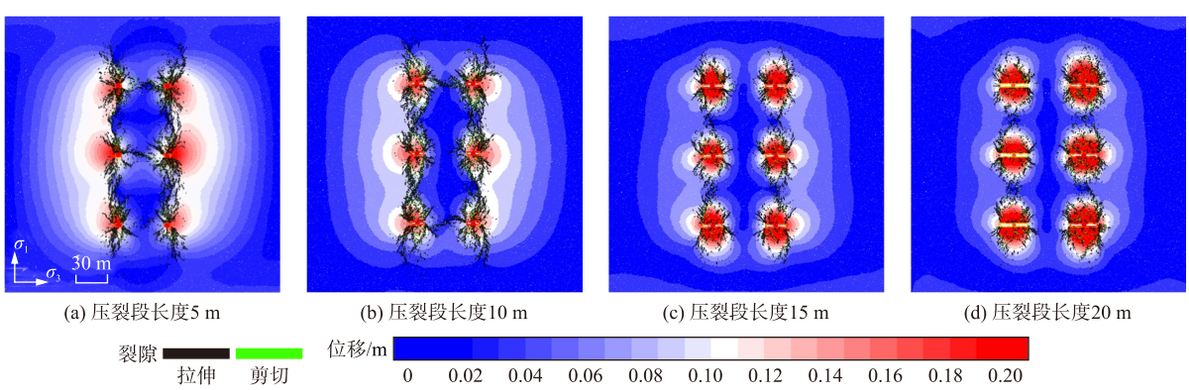


图 10 不同压裂段长度的水力压裂效果

Fig. 10 Hydraulic fracturing effect of different fracturing section lengths

3.2 水力压裂效果预评价

水力压裂的核心目的是增加岩体中的裂隙，降低岩体的完整性和强度. 在 PFC 模拟中，岩体的完整性还可以通过力链变化来反映. 力链是颗粒系统内部传递应力的主要途径，其破坏程度反映了岩体强度的变化. 用力链强度 P_C 来表征水力压裂过程中煤岩体内部结构变化和力学性能的劣化程度[35]. 可表示为

$$P_C = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{S}\sigma_i, \tag{1}$$

式中：σ_i 为第 i 个力链中接触力的大小；S 为力链总数.

提取了不同因素下的水力压裂过程中的裂隙数量和力链强度，如图 11 所示.

整体来看，随着水力压裂的进行，裂隙数量呈现先快速增长又减缓的特征，表明岩体中的裂隙扩展范围逐渐稳定. 压裂参数的增大或压裂间距的减小有助于裂隙的扩展，注水压力对裂隙发育的影响最大.

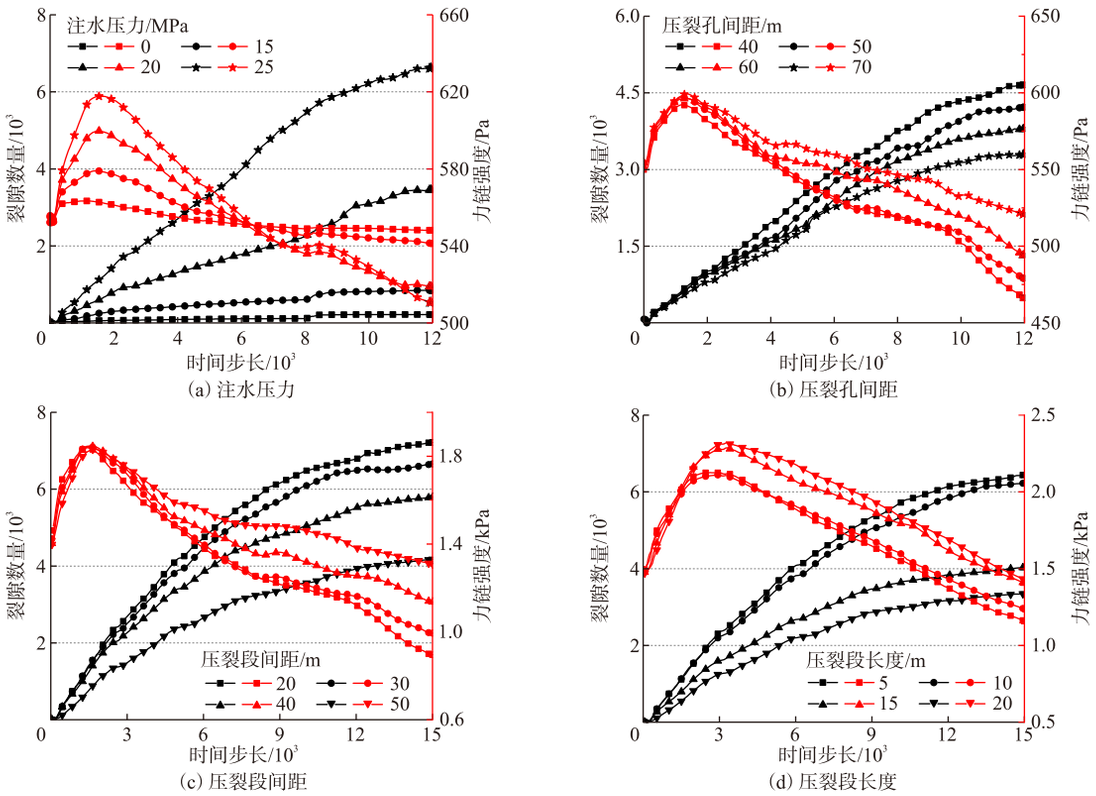


图 11　不同因素下水力压裂过程裂隙数量和力链强度

Fig. 11　Number of fractures and strength of force chain in hydraulic fracturing process under different factors

力链强度随着水力压裂的进行呈现先增加后减小的特点．主要原因为，压裂初期裂隙扩展较少，水力压裂载荷持续增加导致岩体颗粒间发生挤压，力链强度升高；而随着水力压裂的进行，颗粒间力链被破坏，裂隙扩展加剧，岩石强度降低，从而导致力链强度的逐渐降低．

为实现水力压裂效果的定量化、多维度评价，达到最佳的压裂效果，提出了 PFC 模拟水力压裂效果的定量化综合评价指标 E_{FC}，该指标整合了裂隙扩展的几何特征与力链退化的力学特征．

$$E_{FC}=\omega_1 E_F+\omega_2 E_C, \tag{2}$$

式中：E_F 为裂隙特征评价指标；E_C 为力链特征评价指标；ω_1 和 ω_2 为权重系数．

$$E_F=a_1 D_F+a_2 C_F, \tag{3}$$

式中：D_F 为裂隙密度，即裂隙的发育程度；C_F 为裂隙连通率，即压裂孔间连通裂隙占总裂隙的比例；a_1 和 a_2 为权重系数．

D_F 可表示为：

$$D_F=\frac{N_F}{V}, \tag{4}$$

式中：N_F 为裂隙数量；V 为数值模型的体积，m^3．

C_F 可表示为：

$$C_F=\frac{N_C}{N_F}, \tag{5}$$

式中　N_C 为连通裂隙的数量．

E_C 可表示为：

$$E_C=b_1 U_C+b_2 R_C, \tag{6}$$

式中：U_C 为弱力链比例，即弱力链数量占总力链数量的比例，可反映水力压裂对颗粒黏结的削弱效果；R_C 为压裂前后的力链强度降低比例；b_1 和 b_2 为权重系数．

U_C 可表示为：

$$U_C=\frac{N_W}{S}, \tag{7}$$

式中　N_W 为弱力链的数量．低于力链均值的力链称为弱力链．

R_C 可表示为：

$$R_C=\frac{\Delta P_C}{P_C}, \tag{8}$$

式中　ΔP_C 为压裂前与压裂后的力链强度差值．

以上的指标均可以通过 PFC 软件内置的 fish 语言记录．基于提出的综合评价指标 E_{FC}，为确定各评价指标的权重系数，本研究综合考量了各指标在表征岩体弱化效果中的物理意义与重要性．裂隙的扩展与贯通是水力压裂的首要目标，而力

链网络的退化则是岩体强度劣化的内在力学响应,作为重要补充.

基于此,确定裂隙特征权重ω_1=0.6,力链特征权重ω_2=0.4,因其裂隙指标更能直接表征压裂的“范围”和“强度”效果而被赋予更高重要性;在二级指标中,a_1,a_2,b_1,b_2均被赋值为0.5,此赋值是基于初步的敏感性分析,表明在当前的评价模型框架下,这2个二级指标对于其所属的一级指标的贡献度相近,暂未发现某一指标具有绝对的优先性.该权重体系符合层次分析法(AHP)的一致性验证[36].计算得到不同因素下的E_F,E_C和E_{FC},如表4所示.E_{FC}越高,表明水力压裂的效果越好.

基于表4,统计了不同因素下的E_{FC},如图12所示.可以看出,随着工艺参数的优化,E_{FC}呈现出边际递减效应,具体表现为:随着注水压力的增加而迅速增加,但是当注水压力大于15 MPa后大幅度降低;随着压裂钻孔间距的减小而增加,但是压裂钻孔间距减小至50 m后大幅度降低.不同压裂段间距和不同压裂段长度的E_{FC}也呈现相同的特点.也即表明,当水力压裂达到一定程度后,即便是继续增大压裂参数或是减小压裂间距,也无法达到更明显的水力压裂效果,反而会造成压裂材料的大量损耗.因此,在当前的开采地质条件下,注水压力大于15 MPa,压裂孔间距小于50 m,压裂段间距小于30 m,压裂段长度小于10 m时,即可以达到较好的水力压裂效果.

表4 不同因素下的力链和裂隙指标参量

Table 4 Force chain and fracture index parameters under different factors

参数	数值	E_F		E_C		E_{FC}/%
		D_F/%	C_F/%	U_C/%	R_C/%	
注水压力/MPa	5	0.58	0.00	0.40	1.26	1.12
	10	2.53	0.00	1.76	2.52	3.40
	15	9.38	0.48	6.53	6.67	11.52
	20	14.25	0.49	7.92	7.57	15.11
压裂孔间距/m	40	11.38	1.58	7.92	16.04	18.46
	50	10.75	0.74	7.48	13.69	16.34
	60	9.30	0.03	6.47	11.17	13.49
	70	7.88	0.00	5.48	6.31	9.83
压裂段间距/m	20	17.75	1.08	11.25	33.90	31.99
	30	17.00	0.88	11.97	30.07	29.96
	40	14.63	0.50	10.30	20.07	22.75
	50	10.30	0.56	7.25	7.82	12.96
压裂段长度/m	5	16.05	1.21	11.30	19.12	23.84
	10	15.75	1.32	11.09	16.49	22.32
	15	10.38	0.80	7.31	5.14	11.81
	20	8.90	0.59	6.27	3.45	9.60

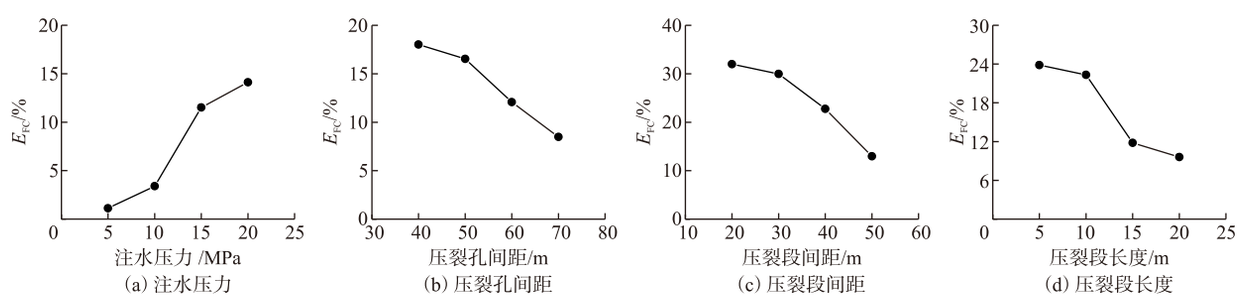


图12 不同因素下水力压裂效果

Fig. 12 Hydraulic fracturing effect under different factors

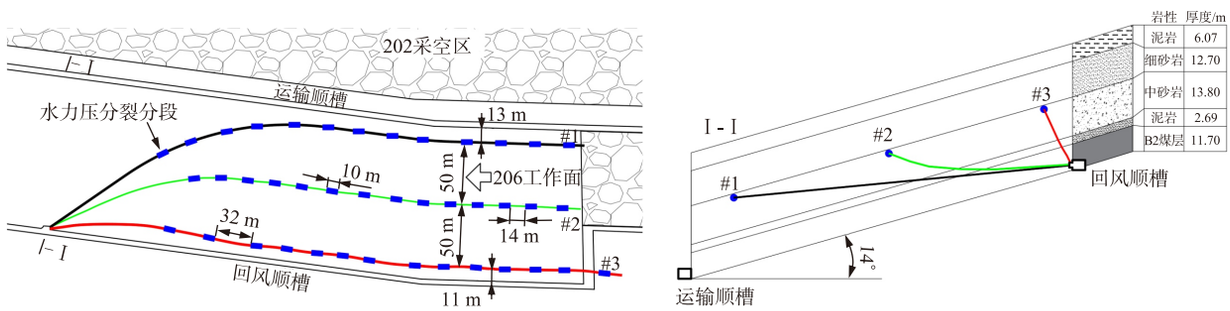
4 水力压裂防冲工程应用及效果检验

4.1 钻孔布置及压裂参数设计

根据前述研究结果,确定了206工作面定向长孔分段水力压裂布置及参数,如图13所示.水力压裂钻孔垂高层位布置在距离煤层上方15 m位置处,主要针对上覆中粒砂岩和细粒砂岩的组合砂岩层(厚度分别为13.80和12.70 m,见图4).考虑

到将压裂区域覆盖整个工作面开采范围，共布置3个压裂钻孔：1号孔平面位置距离运输顺槽约13 m位置，2号孔布置在工作面中部，3号孔布置在平面位置距离回风顺槽约11 m位置，钻孔间距为50 m. 每个孔长度为470～502 m，每个孔压裂13或14段. 具体参数如表5所示.

受限于局部地质构造和钻孔施工弯曲导致的局部不保压情况，实际施工中单段注液量和注水压力发生一定范围波动，平均值分别为42 m^3和15.7 MPa. 此外，钻孔过程中遇到局部泥岩夹层情况，现场将夹层附近的压裂段长度缩短至6～8 m，同时加密段间距缩至14～20 m，确保压裂压力集中于目标砂岩层；无夹层区域保持10 m段长度和30 m段间距，整体平均段长度8 m、平均段间距22 m.



(a) 俯视图　　(b) 剖面图

图13　206工作面定向长孔分段水力压裂布置

Fig. 13　Layout of directional long hole segmented hydraulic fracturing for 206 working face

表5　水力压裂设计参数与工程实施参数对比

Table 5　Comparison of design parameters and engineering implementation parameters for hydraulic fracturing

参数	设计参数	工程实施参数
压裂层位	中粒砂岩＋细粒砂岩	中粒砂岩＋细粒砂岩
单段注液量/m^3	40	37～49（平均42）
注水压力/MPa	＞15	13.7～16.8（平均15.7）
压裂孔间距/m	50	48～51（平均50）
压裂段间距/m	＜30	14～32（平均22）
压裂段长度/m	＜10	6～10（平均8）

4.2　水力压裂防治冲击地压效果检验

4.2.1　裂隙扩展范围

瞬变电磁法通过钻孔下放发射装置，向地下发射时间变化的脉冲电流，产生一次电磁场. 当一次电磁场的电流突然断开时，地下导电介质中会因电磁感应产生瞬态感应涡流，这些涡流在地下随时间和空间扩散. 感应涡流形成的二次电磁场会被接收线圈探测到，通过测量二次电磁场的衰减规律，可以推断地下介质的电性分布. 对于富含水的岩层电导率较高，表现为较强的二次电磁场响应和较慢的衰减速度. 通过对测量数据进行反演，可以绘制地下电阻率分布图，从而直观反映不同位置的含水率差异，判断水力压裂前后的裂隙扩展范围.

选用YCS40(A)型矿井瞬变电磁仪对60～420 m里程(含全部压裂段)进行了瞬变电磁探测. 钻孔施工后，采用高压水冲洗钻孔，将发射线圈与接收线圈集成的探测探头通过高强度电缆下放至钻孔指定测点，线圈平面垂直于钻孔轴线，确保电磁场径向辐射覆盖目标探测范围. 设定发射脉冲宽度0.5 ms、频率25 Hz、叠加次数256次，采样时间窗口0.1～20 ms，关闭钻孔周围50 m范围内的电机等强电磁干扰源；完成单个测点数据采集后，通过电缆将探头移动至下一测点，重复上述步骤直至全部测点测试完毕获得水力压裂前钻孔瞬变电磁数据. 实施钻孔水力压裂后，重复上述过程，获得水力压裂后的钻孔瞬变电磁数据.

以3号钻孔为例，将水力压裂前后的测量数据进行反演后绘制了电阻率云图，如图14所示. 云图中蓝绿色区域表示低电阻率区(相对含赋水区)，红色表示相对高电阻率区(弱含水区或不含水区). 钻孔压裂段区域形成连续的低电阻率区发

育，且该区域每段压裂对应位置都发育明显条带状纯低电阻率区．钻孔径向压裂段对应条带状发育最远距离超过 35 m，相邻压裂段间对应区域均发育有连续的低电阻率区．瞬变电磁探测结果表明水力压裂的裂隙覆盖了整个压裂区域，破坏了岩层的完整性．这一探测结果验证了前述基于颗粒流数值模拟揭示的水力压裂裂隙演化规律及双指标综合预评价模型结论的可靠性，证明了本研究构建的数值模拟方案及效果预评价方法能够反映实际水力压裂的工程响应特征．

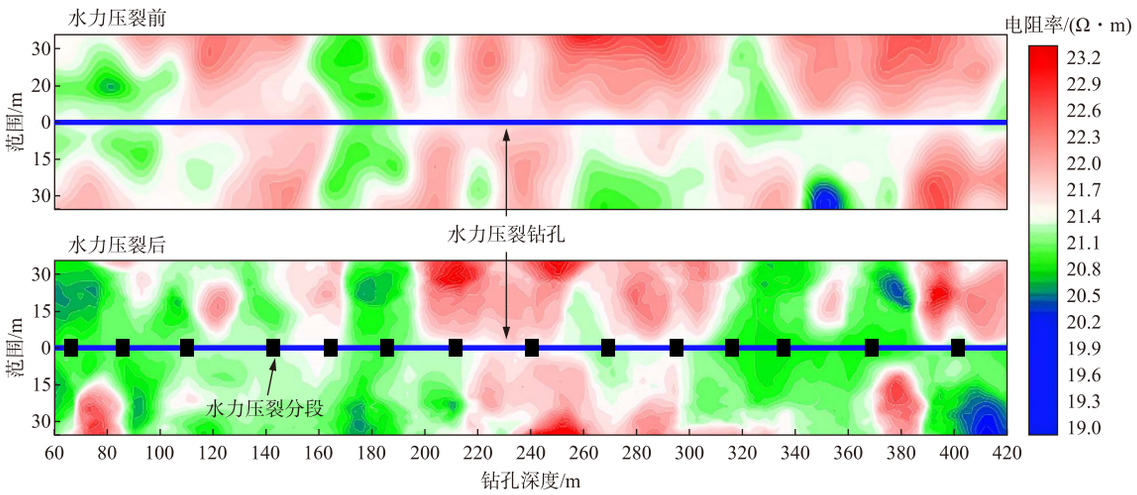


图 14 水力压裂前后钻孔内瞬变电磁探测结果

Fig. 14 Transient electromagnetic detection results inside the borehole before and after hydraulic fracturing

4.2.2 冲击地压防治效果

水力压裂防治冲击地压的效果可以通过安装在煤矿井下的实时监测系统来反映，比如微震监测系统和液压支架监测系统．分析对比实施冲击地压防治措施的前后监测数据的变化，从而检验定向长钻孔分段水力压裂措施防治冲击地压的效果．

统计了 206 工作面 2022-8-10—2023-8-10 开采期间的微震事件每日频次、最大能量和总能量，如图 15 所示．实施定向长钻孔分段水力压裂措施后，微震事件的每日频次明显升高，最大能量和总能量均有明显降低．其中每日平均频次增加了 53.8%，平均最大能量减少了 43.0%，平均总能量减少了 37.8%．说明实施了新的冲击地压防治措施后，能量主要以高频低能的形式释放，控制了能量释放的速率．顶板破断产生的震动事件对工作面的冲击扰动效应降低，有效降低了冲击地压危险性．

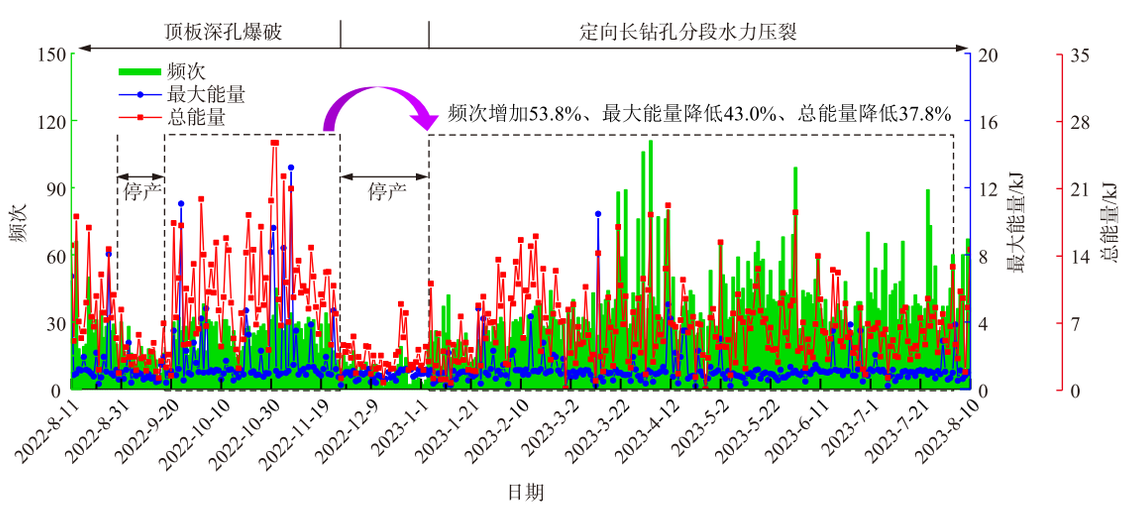


图 15 206 工作面开采期间微震事件的每日频次、最大能量和总能量的演化特征

Fig. 15 Evolution characteristics of daily frequency, maximum energy, and total energy of microseismic events during the mining period of 206 working face

提取了206工作面2022-8-10—2023-8-10开采期间的液压支架载荷变化数据，如图16所示．可以看出，采用顶板深孔爆破作为卸压措施期间，工作面周期来压步距长，最大为37.2 m，平均约28.6 m，且周期来压范围大，时间长．实施定向长钻孔分段水力压裂措施后，周期来压步距明显降低，平均来压步距由28.6 m降低至18.5 m，最小来压步距仅为12.8 m．工作面中部的载荷范围和强度减小，周期来压步距随着工作面的开采逐渐稳定．相比于爆破阶段，表明定向长钻孔分段水力压裂实施后，压裂段之间有裂隙贯通，降低了顶板长距离悬露造成的高静载应力集中，减少了突然断裂时产生的大能量震动事件，有效地降低了冲击地压危险性．

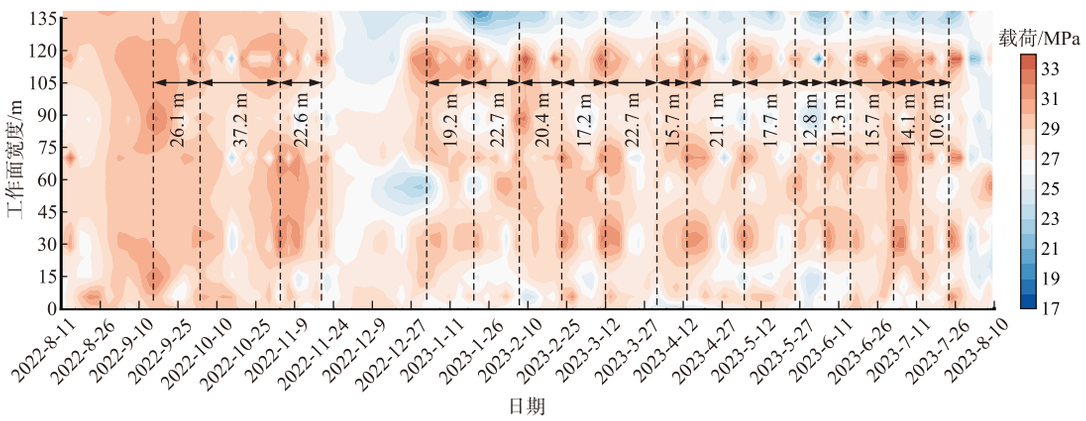


图16　206工作面开采期间液压支架载荷变化云图

Fig. 16　Cloud map of load changes on hydraulic support during mining at 206 working face

5　水力压裂防治冲击地压方法体系

基于上述研究成果，总结构建了水力压裂防治冲击地压方法体系，共分为以下五部分，如图17所示．

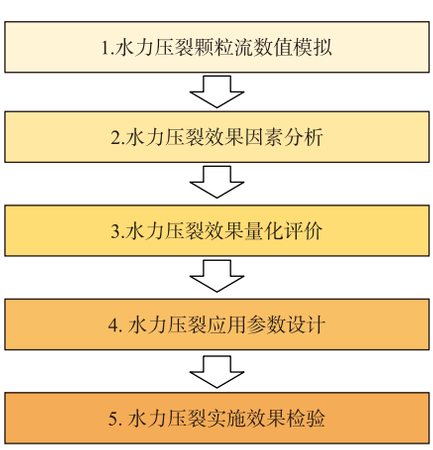


图17　水力压裂防治冲击地压方法体系

Fig. 17　Hydraulic fracturing method system for preventing rockburst

第一，基于工作面的地质及开采资料，明确压裂目标厚硬顶板岩性特征、地应力分布等关键参数，构建与实际地质条件匹配的水力压裂数值模型．第二，开展不同影响因素的水力压裂效果敏感性分析，分析各影响因素对裂隙扩展效果、压力集中效应作用机制，及对水力压裂效果的调控规律．第三，构建水力压裂效果量化评价模型，定量化预评价不同参数组合的压裂效果，识别效果提升的边际递减效应临界点，为最优参数筛选提供量化依据，是体系的核心环节．第四，结合评价结果和现场施工可行性，筛选最优参数组合，进行水力压裂的工程应用参数设计，对目标岩层进行水力压裂．第五，开展水力压裂工程应用的效果检验．效果检验分为两部分：第一部分是检验水力压裂的裂缝扩展范围，第二部分是通过对比实施水力压裂前后的工程现场的数据变化来检验水力压裂防治冲击地压效果．

6　结　论

1）采用PFC2D建立了水力压裂数值模型，研究了不同因素对水力压裂的裂纹起裂、扩展和贯通的影响机制．不同因素通过特定机制影响水力压裂效果，提高注水压力直接增强了流体驱动裂缝的扩展能力和网络的复杂性；减小压裂钻孔间距和压裂段间距有利于促进裂缝在水平方向和轴向（沿钻孔方向）的相互连通；缩短压裂段长度则可集中压力实现更密集的局部压裂．

2）提出了基于裂隙特征和力链特征的双指标

水力压裂效果评价模型,实现了水力压裂效果的量化表征.水力压裂效果随着注水压力的增加、压裂孔间距的减小、压裂段间距的减小和压裂段长度的减小而增加,但会出现边际递减效应,即水力压裂效果增加幅度逐渐减缓,为确定最优工程参数提供了理论依据和量化工具.

3)进行了水力压裂的防冲工程应用和效果检验,根据水力压裂评价模型确定了水力压裂参数并进行了现场实施.瞬变电磁探测结果表明水力压裂的裂隙径向范围超过35 m,覆盖了整个压裂区域.对比非水力压裂区域,工作面回采时的微震事件每日频次明显升高,最大能量和总能量降低了43.0%和37.8%,平均来压步距由28.6 m降低至18.5 m.水力压裂措施显著降低了工作面荷载,降低了冲击地压危险性.

4)构建了"数值模拟-因素分析-效果评价-参数设计-效果检验"的水力压裂防治冲击地压方法体系,为水力压裂的参数优化及防治冲击地压提供了系统化支撑.

参考文献:

[1] 潘一山,宋义敏,刘 军.我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J].岩石力学与工程学报,2023,42(9):2081-2095.
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081-2095.

[2] 朱小景,潘一山,李 祁,等.巷道冲击地压软化区能量极值判别准则及试验研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(5):975-982.
ZHU Xiaojing, PAN Yishan, LI Qi, et al. Energy extreme value criterion and experimental study on softening zone of rock burst in roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5): 975-982.

[3] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Current situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.

[4] 卢志国,高富强,杨 磊,等.深埋巷道动静载叠加诱冲物理模拟试验系统研制与应用[J].中国矿业大学学报,2025,54(5):959-970.
LU Zhiguo, GAO Fuqiang, YANG Lei, et al. Development and application of a novel physical simulation test system for deep coal burst roadway with dynamic-static combined loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 959-970.

[5] 李振雷,何学秋,窦林名.综放覆岩破断诱发冲击地压的防治方法与实践[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):162-171.
LI Zhenlei, HE Xueqiu, DOU Linming. Prevention method and practice of rock burst induced by overburden fracture in fully mechanized top-coal caving[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 162-171.

[6] 郑凯歌,郭 伟,张 俭,等.厚硬顶板冲击地压井下长钻孔压裂防治关键技术装备与工程实践[J].煤炭科学技术,2025,53(9):228-245.
ZHENG Kaige, GUO Wei, ZHANG Jian, et al. Key technical equipment and engineering practice of long borehole fracturing prevention and control in thick and hard roof rock burst underground[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 228-245.

[7] 曹安业,郝 琪,崔玉江,等.高构造应力区顶板深孔爆破裂纹扩展机制与应用研究[J].采矿与安全工程学报,2025,42(1):97-107.
CAO Anye, HAO Qi, CUI Yujiang, et al. Study on crack propagation mechanism and application of deep hole blasting in roof of high tectonic stress area[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2025, 42(1): 97-107.

[8] 张 群,葛春贵,李 伟,等.碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J].煤炭学报,2018,43(1):150-159.
ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, et al. Efficient CBM extraction mode by staged fracturing of horizontal well in roof of broken soft and low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 150-159.

[9] 吴能友,李彦龙,万义钊,等.海域天然气水合物开采增产理论与技术体系展望[J].天然气工业,2020,40(8):100-115.
WU Nengyou, LI Yanlong, WAN Yizhao, et al. Prospect of production enhancement theory and technology system for marine natural gas hydrate exploitation[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 100-115.

[10] 冀胤霖,张苏鹏,朱鸿鹄,等.深地工程中岩体界面的摩擦-渗流耦合机理与调控技术:综述与展望[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(6):5-53.
JI Yinlin, ZHANG Supeng, ZHU Honghu, et al. Friction-seepage coupling mechanism and control technology of rock mass interface in deep engineer-

ing: Review and prospect[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(6): 5-53.

[11] XIA B W, ZHANG X, YU B, et al. Weakening effects of hydraulic fracture in hard roof under the influence of stress arch[J].International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6): 112-119.

[12] 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: 2582-2593.

[13] 胡千庭, 刘继川, 李全贵, 等. 煤层顶板分段水力压裂应力及裂缝演化试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1084-1095.
HU Qianting, LIU Jichuan, LI Quangui, et al. Study on stress and fracture evolution of sectional hydraulicf racturing of coal seam roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1084-1095.

[14] 李英杰, 倪　婷, 左建平, 等. 坚硬顶板定向水力压裂裂纹起裂机制及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10): 2015-2029.
LI Yingjie, NI Ting, ZUO Jianping, et al. Analysis of crack initiation mechanism and influencing factors of directional hydraulic fracturing in hard roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(10): 2015-2029.

[15] TIAN X Y, GONG S Y, DOU L M, et al. Characterize the influences of hydraulic fracturing on preventing rock burst from the stress and vibration fields[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2024, 10(1): 1-18.

[16] 何　杰, 程　蓬, 吴　乐, 等. 坚硬顶板动压巷道远近应力场演化规律及调控技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 1-11.
HE Jie, CHENG Peng, WU Le, et al. Evolution law and control technology of far and near stress field in dynamic pressure roadway with hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 1-11.

[17] 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 effect evaluation method of surface hydraulic fracturing for rock burst prevention in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4390-4405.

[18] 李全贵, 彭淑悦, 梁运培, 等. 煤层顶板水平井分段水力压裂微震监测与评价[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(4): 46-57.
LI Quangui, PENG Shuyue, LIANG Yunpei, et al. Microseismic monitoring and evaluation of staged fracturing in horizontal well of coal seam roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(4): 46-57.

[19] 石　垚, 汪占领, 程利兴, 等. 煤矿水力压裂巷道卸压技术应用及效果评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(2): 459-471.
SHI Yao, WANG Zhanling, CHENG Lixing, et al. Application and effect evaluation of hydraulic fracturing roadway pressure relief technology in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(2): 459-471.

[20] 李彦伟, 朱超凡, 曾壹坚, 等. 层理特征对油页岩水力压裂裂缝扩展规律影响的数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 44-54.
LI Yanwei, ZHU Chaofan, ZENG Yijian, et al. Numerical simulations of the effects of bedding planes on hydraulic fracturepropagation law in oil shale[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(11): 44-54.

[21] 张　玉, 王鹏胜, 李大勇, 等. 考虑水力耦合的射孔围岩水力压裂破裂数值模拟方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 409-419.
ZHANG Yu, WANG Pengsheng, LI Dayong, et al. Numerical simulation method for hydraulic fracturing failure of perforated surrounding rock considering hydraulic coupling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 409-419.

[22] 程利兴, 张　镇, 姜鹏飞, 等. 基于顶板水力压裂卸压的应力场响应机制研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 722-729.
CHENG Lixing, ZHANG Zhen, JIANG Pengfei, et al. Study and application of stress field response mechanism based on roof hydraulic fracturing pressure relief[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4): 722-729.

[23] 梁运培, 李其罡, 黄旭超, 等. 基于颗粒流的倾斜厚煤层坚硬顶板运动失稳规律及水力弱化参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增 1): 3428-3438.
LIANG Yunpei, LI Qigang, HUANG Xuchao, et al. Study on movement and instability law of hard roof and hydraulic weakening parameters of inclined thick coal seam based on particle flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Sup

1):3428-3438.

[24] 马军强,王红胜,董国伟,等.煤系岩层水力裂缝扩展轨迹及压裂效果智能预测研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(6):138-159.
MA Junqiang, WANG Hongsheng, DONG Guowei, et al. Study on hydraulic fracture propagation trajectory and intelligent prediction of fracturing effect in coal measure strata[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(6): 138-159.

[25] 梁 顺,张 渊,落弘业,等.多孔水力压裂缝网耦合扩展规律及硬岩巷道快掘工艺优化研究[J].采矿与安全工程学报,2025,42(4):807-822.
LIANG Shun, ZHANG Yuan, LUO Hongye, et al. Study on coupled propagation law of multi-hole hydraulic fracturing network and optimization of rapid excavation technology for hard rock roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(4): 807-822.

[26] 冯国瑞,樊一江,王朋飞,等.基于离散元法的类岩石材料水力压裂裂缝扩展规律[J].煤炭学报,2024,49(5):2231-2246.
FENG Guorui, FAN Yijiang, WANG Pengfei, et al. Fracture propagation law of rock-like material hydraulic fracturing based on discrete element method [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2231-2246.

[27] 严成增,郑 宏,孙冠华,等.基于FDEM-Flow研究地应力对水力压裂的影响[J].岩土力学,2016,37(1):237-246.
YAN Chengzeng, ZHENG Hong, SUN Guanhua, et al. Study on influence of in-situ stress on hydraulic fracturing based on FDEM-Flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 237-246.

[28] 李昊擂,刘怀东,刘长友,等.巷道顶板水力裂缝卸压的相场模型及数值模拟研究[J].中国矿业大学学报,2025,54(5):971-983.
LI Haolei, LIU Huaidong, LIU Changyou, et al. Phase field model and numerical simulation study of hydraulic fractures for roadway roof pressure relief [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 971-983.

[29] DONG Q, WANG Y, CHEN B. Mesoscopic interpretation of hydraulic fracture initiation and breakdown pressure using discrete element method [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 163: 105739.

[30] LIU T T, SHAO Y Q, ZHANG C, et al. Analysis of crack propagation and hydraulic fracturing behavior of coral reef limestone [J]. Computational Particle Mechanics, 2025, 12(2): 809-829.

[31] Itasca Consulting Group. PFC 6.0 Manual[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2020.

[32] 马军强.煤系坚硬顶板水力压裂裂缝扩展规律及应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2024.
MA Junqiang. Study on propagation law and application of hydraulic fracturing cracks in hard roof of coal measure [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.

[33] 曾 卫.基于离散元流-固耦合优化算法的岩石渗透破裂机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
ZENG Wei. Study on seepage failure mechanism of rock based on discrete element fluid-solid coupling optimization algorithm [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[34] 赵卫卫.坚硬顶板井下分段水力压裂防冲机理及影响因素研究[D].徐州:中国矿业大学,2024.
ZHAO Weiwei. Research on rockburst prevention mechanism and influencing factors of underground staged hydraulic fracturing with hard roof [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.

[35] LU A L, SONG D Z, LI Z L, et al. Numerical simulation study on pressure-relief effect of protective layer mining in coal seams prone to rockburst hazard [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(8): 6421-6440.

[36] 赵 红.层次分析法在定量分析中的应用[J].中国公共安全(学术版),2010(1):134-136.
ZHAO Hong. Analytic hierarchy process in quantitative analysis [J]. China Public Security (Academy Edition), 2010(1): 134-136.

(责任编辑 沈 菊 宋 爽)