基于微震监测的水力压裂裂隙扩展规律及控制因素研究

范继超,蒋齐平,王艳波,李文刚,王杰,刘航

中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西西安710077

中图分类号:TD713 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2025)02-0022-07 DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2025.08.005

摘要 水力压裂是弱化煤层坚硬顶板,解决井下强矿压、大面积悬顶等动力灾害的关键技术。准确掌握水力压裂过程中坚硬 顶板裂隙扩展规律,对于压裂精准施工和效果评价具有重要意义。以渭北某矿井水力压裂工程为背景,采用微震监测技术监 测顶板压裂过程中裂隙扩展过程,揭示顶板裂隙扩展规律,评价顶板水力压裂效果并探讨其控制因素。微震监测结果表明: 4203 工作面坚硬顶板水力压裂过程中顶板裂隙随压裂不断向两侧动态扩展,运输巷道侧裂隙扩展范围为 26~33 m,辅运巷道 侧扩展范围 30~42 m。卸压钻孔监测数据显示辅运巷道侧裂隙扩展范围较大,达到 42 m,与微震监测结果基本一致,说明裂隙 已经扩展至卸压孔孔底位置,水力压裂效果较好。水力压裂过程中压裂裂隙的扩展范围与压力和压裂时长呈正相关关系,且 压裂裂隙的扩展范围同时受到周边采空区的影响。研究成果为精准评价工作面坚硬顶板水力压裂效果提供了科学依据,为微 震监测技术在煤矿领域的深入应用奠定基础。

关键词 水力压裂;微震监测;裂隙扩展范围;控制因素

引言

随着煤炭开采深度的不断增加,上覆围岩压力逐 渐加大,易诱发强矿压,形成顶板动力灾害,严重威胁 煤炭开采安全和高效生产^[13]。

为解决深部开采强矿压诱发的顶板动力灾害问题,国内外学者通过对煤层顶板覆岩破断特征分析, 研发出坚硬顶板水力压裂治理技术,并在部分矿井得 到成功应用⁽¹⁾。实践证明,经顶板弱化治理后的工作 面矿压强度得到有效降低。但目前,对于煤层坚硬顶 板水力压裂动态过程研究相对较少,无法为水力压裂 提供实时监测数据,导致水力压裂实时效果评价不佳, 不能做到水力压裂技术方案的实时优化调整,一定程 度上造成了顶板动力灾害防治措施的"不足"和 "过度浪费",增加煤炭产出成本。

目前,水力压裂效果评价方法相对较多,但尚未 总结出通用的方法。前人提出的方法大多只适于某 种特定条件下的水力压裂效果评价。比如,在煤层气 抽采领域,主要通过对比压裂前后煤层气抽采数据的 变化从而对压裂效果进行评价,无法直观展示裂隙扩 展方向和形态,对压裂技术参数难以进一步优化^[50]。

此外,康红普等四采用空心包体应变计对压裂钻孔附 近地层应力进行监测,借助压裂前后地层应力的变化 判断压裂效果,为水力压裂提供了压力实时监测数据。 然而,该方法的应用对施工条件要求较高,需要在巷 帮布设专门的测试孔,施工工程量较大,获取的应力 变化量与压裂范围之间缺乏明确的定量关系,难以对 压裂范围进行准确圈定。朱海波®利用广义投射系数 法反演震源机制,得到压裂裂隙扩展的方位和倾角等 参数,但难以在宏观上判定裂隙的发育范围和动态扩 展情况。赵睿『利用钻孔瞬变电磁法探查未放水钻孔 中的低阻异常范围来确定压裂范围,但压裂目标岩层 中原有的含水体会影响瞬变电磁法的探查效果,且单 次探查难以有效确定压裂范围。李好109 采用无线电 波透视的方法对压裂范围进行探查,但该方法适用范 围局限,只能对回采工作面顺层孔进行探查,无法评 价穿层孔、掘进巷道的压裂效果。

近年来,部分学者开始尝试将已在油气储层水力 压裂效果评价广泛应用的微震监测技术¹¹¹用于煤炭 开采领域,主要是通过微震事件定位反映工作面回采 过程中顶底板裂隙发育情况或用于监测冲击地压^[12-4]。 微震监测技术具有操作灵活、施工难度低、多范围监

收稿日期:2024-11-05

基金项目:国家重点研发计划课题(2023YFC3008903);陕西省自然科学基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0361);中煤科工西安研究院(集团) 科研项目(2020XAYDC02-04)

作者简介:范继超(1993—),男,陕西渭南人,硕士,从事矿山灾害监测工作,E-mail:1762658421@qq.com。

测、重复利用、工作量小和微震事件定位准确的优点。 同时, 井下微震监测系统还具备近距离监测目标、获 取信噪比高的微震事件的功能特性。因此, 在以往成 果基础上, 笔者尝试通过微震监测技术, 揭示水力压 裂下坚硬顶板裂隙扩展过程, 为评价水力压裂顶板弱 化效果提供一种新思路和方法。

本文以渭北某煤矿坚硬顶板水力压裂工程为背景,采用井下微震监测技术对顶板压裂过程进行实时 监测,旨在揭示顶板压裂裂隙扩展规律、评价水力压 裂效果并对其影响控制因素进行研究,为井下微震监 测技术在煤层坚硬顶板压裂过程中的深入应用奠定 基础。

1 微震监测技术原理

煤岩体在受到外力作用时,内部应力失去原有平衡,弹性势能开始集中,当积聚的能量超过煤岩体极限值时就会引发煤岩结构的破裂,释放能量并产生微震动,并以地震波的形式向周围传播^[16]。微震监测技术是通过检波器监测煤岩体破裂时产生的微震动,经地震波反演求取震源,进而获取围岩震动过程微震事件产生时的空间位置、数量和能量特征,并以此分析煤岩体内裂隙发育规律^[15]。

采用微震监测技术评价水力压裂效果,就是对压 裂过程中岩层破裂所产生的微震事件进行空间成像, 分析裂隙的发育过程和扩展范围,为压裂效果评价提 供评价参数。微震监测技术经过多年的发展,在油气、 煤层气开采领域已经成为评价水力压裂效果的有效 方法之一^[17]。压裂作业时,由于围岩应力的非均质各 向异性,使得岩石受到压裂液的高压作用后发生剪切破坏^[18]。此时微震事件就发生在岩石的剪切破裂面上, 压裂液进入剪切破裂面,对破裂面的两侧岩壁持续施 加作用力,使得裂隙扩展释放弹性势能,所产生的震 动被部署在周围的检波器获取^[19]。检波器将微震信号 转化为电压信号,通过通讯线缆传输至采集仪进行存 储,从采集仪将原始数据导出后通过计算机拾取微震 事件,经过定位后进行展示。

2 工程地质背景

某矿 4203 工作面走向长 4485.00 m,倾向长 320.00 m,开采侏罗系延安组 4#煤层,煤层赋存厚度 5.00~7.18 m,煤层倾角 4°~9°,煤层平均埋深 400.00 m。上覆 2 #煤层采空区,与 4#煤层间距约 80.00 m。4203 工作面末采区域(尾端)顶板岩层结构呈现出"直接顶-老顶"无伪顶的结构。直接顶岩层为细粒砂岩,厚度约为 15.00 m,结构较完整,属于半坚硬岩层。直接顶之上是厚度约为 45.00 m 的老顶,岩性为中粒砂岩,结构完整,厚度大,属坚硬岩层(图1)。为防止在工作面末采阶段形成大面积悬顶、强矿压和冲击地压等顶板动力灾害问题,工作面末端开始实施水力压裂坚硬顶板弱化工程。

基于工作面地质情况,本次在工作面上方的老顶 岩层内布设3个顺层定向压裂孔,钻孔间距为60.00m。 结合煤矿井下水力压裂技术进行煤层坚硬顶板压 裂治理工程,并尝试应用微震监测技术对治理效果进 行评价,为后期压裂参数的改进和钻孔布设优化提供 参考。

岩 性	柱 状	埋深/m	厚度/m	岩 性 描 述	
砂质泥岩		296	8.0	深灰色,灰黑色,平坦状断口	
2 煤		300.74	4.74	黑色,条痕色黑色,暗淡型	
砂质泥岩		307.74	7.0	灰色~深灰色,薄层状,参差状断口,坚硬	
中粒砂岩	•••••	314.74	7.0	灰白色,分选较好,夹细,粉砂质条带	
砂质泥岩		334.74	20.0	浅灰色,平坦状断口,斜裂隙发育	
中粒砂岩	······	353.74	19.0	粉红色,厚层状,见平行层理级小型交 错层理	
细粒砂岩		368.74	15.0	浅灰色,中厚层状,坚硬	
4 煤		374.65	5.91	黑色,条痕色黑色,半暗型煤	
砂质泥岩		379.65	5.0	深灰色,薄层状,参差状断口,坚硬	

图1 压裂监测区顶底板岩性柱状图

Fig. 1 Lithologic bar chart of roof and floor in fracturing monitoring area

3 水力压裂微震监测方案

微震监测技术常用的观测方式有 3 种: 井下观测、 地面监测、井-地联合观测[™]。根据不同的施工条件以 及目的选择不同的观测方式。其中, 地面观测常用于 油气开采水力压裂效果的评价, 井下监测常用于煤矿 底板水害监测以及冲击地压的监测, 井-地联合监测常 用于顶板裂隙带发育监测。理论上讲, 4 道微震监测 数据即可定位微震事件的发生位置。但在观测系统 的实际布设过程中, 大多数研究人员为保证信号质量 和定位精度, 都会在现有施工条件下尽可能多地布设 检波器。

坚硬顶板水力压裂区域治理,最重要的考核指标 为裂隙在平面上的扩展范围。当水力裂隙在平面上 的扩展范围足够大时,才可以实现区域治理。由于 4203 工作面埋深相对较浅,水力压裂产生裂隙多为水 平缝网,在垂向上扩展有限。基于此,决定采用"U" 形平面布设方式的井下观测系统对水力压裂裂隙扩 展过程进行监测。鉴于压裂钻孔距辅运巷道较近,在 辅运巷道布设的检波器数量较多,具体布设如下:

微震监测仪器:中煤科工集团西安研究院有限公司生产的 YTZ-3 型井下便携式存储采集仪。

检波器布设方案:在工作面运输巷道布设3个检 波器,道距120.00 m;辅运巷道布设8个检波器,道距 60 m;回撤巷道布设4个检波器,道距60.00 m(图2)。

4 微震监测结果分析

4.1 水力压裂裂隙扩展过程

本次共进行了7个阶段的水力压裂,但压裂期间由于现场条件受限,微震监测设备只完整监测了压裂第2、3、4、5、7段的全过程。其中第1和6段数据缺失。

第2段微震监测:压裂第2段期间最大水压为

16.60 MPa, 压裂时长为 108.00 min。在此过程中共监测到 21 个微震事件, 以水平定向孔为中心近似对称分布, 扩展范围分别为 31.00 m 和 32.00 m, 说明在第2 段水力压裂条件下, 水力裂隙在水平向上呈近似圆形态扩展, 延伸范围约 30.00 m(图 3a)。

第3段微震监测:随着第2段水力压裂结束,压 裂第3段采用17.10 MPa的压力对老顶岩层进行了 132 min的压裂。在该段压裂期间共监测到38个微震 事件,分布范围由近圆形向非对称多边形状转变,工 作面运输巷道侧微震事件分布范围为27.00 m, 辅运 巷道侧微震事件分布范围为42.00 m(图3b)。

第4段微震监测:待到第4段压裂期间,水力压 裂最大水压为16.00 MPa,压裂时长为126.00 min。该 段压裂期间共监测到27个微震事件,主要分布在定 向孔两侧30.00 m的水平范围内,与第1段期间裂隙 扩展过程类似。这一段裂隙扩展特征与两段水平最 大压裂压力和压裂时长有关(图3c)。

第5段微震监测:第5段压裂期间最大水压为 17.50 MPa,压裂时长为103.00 min。该段压裂过程中 共监测到23个微震监测事件,裂隙向钻孔两侧分别延 伸26.00 m、33.00 m; XY 平面投影类似椭圆形(图3d)。

第7段微震监测: 压裂第7段期间最大水压为 20.00 MPa, 压裂时长为101.00 min, 微震事件定位, 共 监测到26个微震事件, 分析认为裂隙向钻孔两侧分 别延伸29.00m、30.00m(XY平面投影图)(图3e)。

由于不同压裂段内压裂时长和压力的不同, 微震 事件数量有所差异, 但就整体而言, 压裂过程中靠近 运输巷道一侧的压裂裂隙扩展范围为 26.00~33.00 m, 辅运巷道侧压裂裂隙扩展范围为 30~42 m, 基本对称 (图 3f, 表 1)。

从图 3a~3e 中看出, 压裂期间在压裂位置前后 均监测到微震事件分布, 由此可得出新生裂隙向压裂 过的方位进行动态扩展。这是因为当钻孔完成一段 压裂后, 钻孔围岩应力发生改变, 在压裂段前方形成



图2 压裂区微震观测系统

Fig. 2 Layout of microseismic observation system in fracturing zone



图 3 微震监测结果(a—压裂第 2 段; b—压裂第 3 段; c—压裂第 4 段; d—压裂第 5 段; e—压裂第 7 段; f—全部压裂段) **Fig. 3** Microseismic monitoring results (a—fracturing section 2; b—fracturing section 3; c—fracturing section 4; d—fracturing section 5; e—fracturing section 7; f—all fracturing sections)

表 1 裂隙扩展微震监测结果

 Table 1
 Monitoring results of microseismic propagation of fractures

压裂 段次	最大 水压/MPa	压裂 时长/min	微震 事件/个	运输巷道侧 裂隙扩展 距离/m	辅运巷道侧 裂隙扩展 距离/m
2	16.6	108	21	31	32
3	17.1	132	38	27	42
4	16.0	126	27	31	30
5	17.5	103	23	26	33
7	20.0	101	26	26	30

应力集中区,后方形成应力薄弱区,在进行下一段压 裂时,该区域岩石所受应力较弱,与围岩应力形成应 力差,当围岩所受压力大于围岩的极限压力时,在应 力薄弱区产生裂隙并与前一段的裂隙贯通,注水加压 后裂隙沿着之前发育的裂隙继续扩展。

此外,从来微震监测结果还可以看出,随着水力 压裂压力和时长的改变,水力裂隙在水平向的扩展表 现出非均匀性,也表明了水力压裂裂隙扩展是个复杂 的多因素耦合控制过程。

4.2 微震监测结果验证

通过观察辅运巷道煤层卸压孔渗水情况对微震 监测结果进行验证。监测区辅运巷道附近有 5 个卸 压孔,钻孔长度 42.00 m,仰角 45°,方位角 300°,钻孔 上下偏差 30.00 m,水平投影长度 30.00 m。卸压孔资 料显示:压裂过程中,工作面辅运巷道 L1、L2、L3 号 卸压孔出现不同程度的渗水,且随着压裂位置后移, 渗水量逐渐减小,压裂停止之后,渗水停止。L1、L2 号卸压孔在压裂第二段后期出现渗水,其中 L2 号钻 孔渗水量较大,L3 号钻孔渗水量较小,L4、L5 号钻孔 未渗水(图 3f)。

结合微震监测结果,第2段压裂结束之后,辅运 巷道一侧破裂范围较大,达到42.00 m,与L2号卸压 孔孔底位置接触,导致L2号孔渗水量较大,另外,L1、 L3号钻孔底虽未与破裂区重合,但由于裂隙向外侧扩 展的原因,也出现少量渗水,因此认为裂隙已经扩展 至卸压孔孔底位置,与微震监测裂隙扩展范围的结果 相符。

4.3 井下压裂裂隙扩展控制因素分析

从微震事件的平面展布来看,此次靠近钻孔辅运 巷道的压裂范围和裂隙扩展范围相对较大,相应的钻 孔辅运巷道一侧微震事件的数量也明显较多。结合 开采、地质条件,对比压裂期间监测到各压裂段微震 事件数量与压力和压裂时间之间的关系,进一步探讨 井下压裂裂隙扩展控制因素。

4.3.1 压裂时长、压力对压裂裂隙扩展规律的 影响

微震事件的数量一定程度上代表了岩石的破裂 程度,换言之,压裂过程中监测到的微震事件越多,说 明压裂裂隙扩展效果越好。通过对比压裂第2段、第 5段、第7段微震事件数量统计数据可知,在压裂时 长大致相同的条件下,微震事件数量与压力呈正相关 关系;对比图中第2段与第5段、第3段与5段数据 可知,在压裂压力大致相同的情况下,微震事件数量 与压裂时长也呈现正相关关系。为明确微震事件数量 与压力、时间的关系,分析了压力与时间的乘积即 冲量(*I*)与微震事件数量之间的相关性质(图 4)。但 本次样本数量较少,水力压裂过程中微震事件数量与 冲量(*I=P*×*t*)存在3种函数关系,分别为:

线性函数关系: N=0.033 1×I-38.47, R²=0.92

指数函数关系: N=2.707e^{0.0121}, R²=0.94

对数函数关系: N=65.628lnI-470.86, R²=0.90

考虑到随压裂时间和压力的增加,压裂路径变长, 对有效压力的损耗变大,压裂对远场岩体裂隙扩展的影 响逐渐减小。故分析认为线性函数和指数函数不太 符合工程经验,对数函数关系则与工程实践经验较为吻 合。因此,在压裂工程施工过程中,可根据微震事件数 量与冲量的对数函数关系,通过适当增加压裂时间和 压裂的压力可提高压裂效果,保证压裂裂隙的扩展。

4.3.2 围岩应力对压裂效果的影响

整个监测过程所获取的微震事件定位结果显示, 钻孔辅运巷道一侧微震事件数量偏多,结合现场施工 条件认为:钻孔辅运巷道临近采空区,相邻工作面回 采结束后,采空区围岩应力发生改变,围岩应力中σ₁ 增大、σ₃减小,应力差Δσ加大(Δσ=σ₁-σ₃),未采工作面 靠近采空区一侧的应力薄弱区,在受到高压水作用后, 应力薄弱区岩石更易破碎,微震事件数量偏多(图 5)。

5 结论

(1)本次压裂实验钻孔两侧的压裂裂隙扩展范围 分别为 26~33 m、30~42 m。不同压裂段微震事件分布 特征表明, 微震监测技术可直观反映压裂过程中裂隙 的动态扩展过程及特征, 是评价坚硬岩层压裂效果的



图4 微震事件数量与压力、时间和冲量的关系(a—线性相关;b—指数相关;c—对数相关)

Fig. 4 Relationship between the number of microseismic events and pressure, time, and impulse (a—linear correlation; b—index correlation; c—logarithmic correlation)

有效方法之一。

(2) 压裂产生的微震事件数量与压裂时长、压力 呈正相关关系, 与冲量具有明显的正相关线性函数关 系。压裂过程中适当提高压裂时长、增加压力有助于 裂隙的产生和扩展; 压裂钻孔靠近采空区一侧裂隙扩 展范围相对显著, 使压裂裂隙扩展范围增大。

(3)微震监测技术可以较完整地集水力压裂过程 中顶板压裂裂隙的扩展数据,能够为坚硬顶板压裂提 供实时数据,较好地反映水力压裂效果,为顶板压裂



图5 采空区围岩应力分析

Fig. 5 Stress analysis diagram of surrounding rock in goaf

技术的优化、调整和深入研究提供技术支撑。

参考文献:

[1]杨俊哲,郑凯歌,王振荣,等.坚硬顶板动力灾害超前弱化治理技术[J].煤炭学报,2020,45(10):3371-3379.
 YANG J Z, ZHENG K G, WANG Z R, et al. The mechanism of

overburden dynamic disasters and its control technology in top-coal caving in the mining of thick coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3371–3379.

- [2] 赵同彬,郭伟耀,谭云亮,等.煤厚变异区开采冲击地压发生的力 学机制[J].煤炭学报,2016,41(7):1659–1666.
 ZHAO T B, GUO W Y, TAN Y L, et al. Mechanics mechanism of rock burst caused by mining in the variable region of coal thickness[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1659–1666.
- [3] 潘一山.煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J].煤炭学报, 2018, 43(8): 2091-2098.
 PAN Y S. Disturbance response instability theory of rock-burst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2091-2098.
- [4] 康红普, 冯彦军. 煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 1-9.

KANG H P, FENG Y J. Hydraulic fracturing technology and its applications in strata control in underground coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 1–9.

- [5] 张俭,郑凯歌,仵胜利,等.水力压裂技术在黄陵二矿的工程试验研究[J].煤炭工程,2017,49(9):72-74+79.
 ZHANG J, ZHENG K G, WU S L, et al. Engineering test research of hydraulic fracturing technology in Huangling No. 2 Mine[J]. Coal Engineering, 2017, 49(9): 72-74+79.
- [6] 韩保山. 低渗煤层压裂机理及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 25-29+35.

HAN B S. Research on fracturing mechanism of low permeability coal seam and application of surface CBM drainage[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 25–29+35.

- [7] 康红普, 冯彦军. 定向水力压裂工作面煤体应力监测及其演化规 律[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1953-1959.
 KANG H P, FENG Y J. Monitoring of stress change in coal seam caused by directional hydraulic fracturing in working face with strong roof and its evolution[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1953-1959.
- [8] 朱海波,杨心超,王瑜,等.水力压裂微地震监测的震源机制反演 方法应用研究[J].石油物探,2014,53(5):556-561.
 ZHU H B, YANG X C, WANG Y, et al. The application of microseismic source mechanism inversion in hydraulic fracturing monitoring[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(5): 556-561.

- [9] 赵睿,范涛,李字腾,等.钻孔瞬变电磁探测在水力压裂效果检测中的应用[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):41-45. ZHAO R, FAN T, LI Y T, et al. Application of borehole transient electromagnetic detection in the test of hydraulic fracturing effect[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 41-45.
- [10] 李好.无线电波坑道透视法在煤矿井下水力压裂效果评价中的应用[J].物探与化探,2017,41(4):741-747.
 LI H. The application of radio wave tunnel penetration methodto evaluating fracturing effect in underground coal mine[J].
 Geophysicaland Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 741-747.
- [11] 闫江平, 庞长庆, 段建华, 等. 煤矿井下水力压裂范围微震监测技术及其影响因素[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(S1): 92-97.
 YAN J P, PANG C Q, DUAN J H, et al. Microseismic monitoring of underground hydraulic fracturing range in coal seam and analysis of influencing factors[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(S1): 92-97.
- [12] 李楠, 王恩元, GE Maochen. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 83-96.
 LI N, WANG E Y, GE M C. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines present status and future prospects[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 83-96.
- [13] 张坤,方海,李邵东,等.大埋深坚硬顶板厚煤层冲击地压微震监测及防治措施[J].中国矿业,2021,30(10):77-83.
 ZHANG K, FANG H, LI S D, et al. Microseismic monitoring and prevention of working face rock burst in thick coal seam with hard roof and large buried depth[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(10): 77-83.
- [14] 靳德武,段建华,李连崇,等.基于微震的底板采动裂隙扩展及导水通道识别技术研究[J].工程地质学报,2021,29(4):962-971.
 JIN D W, DUAN J H, LI L C, et al. Micro seismicity-based research for Ming induced fracture propagation and water pathway identification technology of floor[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 962-971.
- [15] 侯恩科,范继超,谢晓深,等.基于微震监测的深埋煤层顶板导水裂隙带发育特征[J].煤田地质与探,2020,48(5):89-96.
 HOU E K, FAN J C, XIE X S, et al. Development characteristics of water-conducting fractured zone in deep coal seam based on microseismic monitoring[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5):89-96.
- [16] 范继超. 文家坡矿 4104 综放工作面导水裂隙带发育特征研究
 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
 FAN J C. Study on development characteristics of water flowing fracture zone in 4104 working face of Wenjiapo Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [17] 申鹏磊, 吕帅锋, 李贵山. 深部煤层气水平井水力压裂技术-以沁水盆地长治北地区为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2488-2500.
 SHEN P L, LV S F, LI G S. Hydraulic fracturing technology for deep coalbed methane horizontal wells: A case study in North Changzhi area of Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2488-2500.
- [18] 贾奇锋, 倪小明, 赵永超, 等. 不同煤体结构煤的水力压裂裂隙延 伸规律[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 51-57.
 JIA Q F, NI X M, ZHAO Y C. Fracture extension law of hydraulic fracture in coal with different structure[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 51-57.
- [19] 段建华,汤红伟,王云宏.基于微震和瞬变电磁法的煤层气井水 力压裂监测技术[J].煤炭科学技术,2018,46(6):160-166.
 DUAN J H, TANG H W, WANG Y H. Detection technology of

hydraulic fracturing in coalbed methane coal seam based on microseismic monitoring [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 160–166.

技术[J].煤田地质与勘探, 2018, 46(1): 101-107. LI C F, HU W Y, WANG Y H, et al. Comprehensive detection technique for coal seam roof water flowing fractured zone height[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(1): 101-107.

[20] 李超峰, 虎维岳, 王云宏, 等. 煤层顶板导水裂缝带高度综合探查

Fracture Propagation Law and Controlling Factors of Hydraulic Fracturing Based on Micro Seismic Monitoring

FAN Jichao, JIANG Qiping, WANG Yanbo, LI Wengang, WANG Jie, LIU Hang

China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China

Abstract: Hydraulic fracturing was the key technology to weaken the hard roof of coal seam and solve the dynamic disasters such as strong underground pressure and large area hanging roof. Accurately understanding the propagation law of hard roof fractures during hydraulic fracturing is of great significance for precise fracturing construction and effect evaluation. Taking the hydraulic fracturing project of a mine in northern Shaanxi as the object, the microseismic monitoring technology was used to monitor the process of fracture expansion in the process of roof fracturing, reveal the law of roof fracture propagation law, evaluate the effect of roof hydraulic fracturing and discuss its influencing factors. The microseismic monitoring results indicate that in the process of hydraulic fracturing of the hard roof of the 4203 working face, the roof cracks dynamically expand on both sides with the progress of fracturing, and the final extension range of cracks on the side of transportation roadway is $26 \sim 33$ m, and that of the auxiliary transportation roadway is $30 \sim 42$ m. The verification of the pressure relief drilling show that the fracture range on the side of the auxiliary roadway is up to 42 m, which is basically consistent with the microseismic monitoring results, indicating that the fracture has been extended to the bottom of the pressure relief hole, and the hydraulic fracturing effect is better. In the process of hydraulic fracturing, the expansion range of fracturing fracture is positively correlated with pressure and fracturing time, and the expansion range of fracturing fracture is also related to the goaf. The results provide the groundwork for the extensive use of microseismic monitoring technologies in the coal mining industry and offer a scientific basis for precisely assessing the hydraulic fracturing effect of the hard top plate in the working face.

Keywords: hydraulic fracturing; microseismic monitoring; expansion range of fracture; controlling factors of goaf

引用格式:范继超,蒋齐平,王艳波,李文刚,王杰,刘航.基于微震监测的水力压裂裂隙扩展规律及控制因素研究[J].矿产保护与利用,2025, 45(2):22-28.

FAN Jichao, JIANG Qiping, WANG Yanbo, LI Wengang, WANG Jie, LIU Hang. Fracture propagation law and controlling factors of hydraulic fracturing based on micro seismic monitoring[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(2): 22–28.

投稿网址: http://kcbhyly.xml-journal.net

E-mail: kcbh@chinajoumal.net.cn