定向射孔多孔同步压裂裂缝交互扩展规律研究*

丁一,张东峰,张小强,姜玉龙,王开

(太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:针对传统切顶卸压沿空留巷技术很难控制顶板变形垮 落等问题,为了更好地掌握切顶卸压时顶板的裂缝扩展规 律,提出定向射孔多孔同步压裂切顶卸压方案并进行试验研 究。在传统压裂试验过程中,射孔间距、注液速率对裂缝扩 展效果影响较大,通过结合真三轴压裂渗流模拟试验系统与 声发射监测系统,对 300 mm 的立方体砂岩试件进行模拟试 验。结果表明:声发射监测的声发射(AE)事件分布图能很 好地反映出试件压裂过程中每个阶段的裂缝扩展形态和裂 缝扩展规律;裂缝长度、起裂压力和裂缝缝网面积随横向射 孔间距的增大而增大,裂缝宽度随射孔间距的增大而减小; 随着注液速率的增大,主裂缝产生的次生裂缝减小,裂缝偏 移现象也减少,复杂的裂缝也变得单一;压裂初期,裂缝从各 射孔端部起裂,随着压裂的进行,射孔端部的裂缝变得复杂, 主裂缝会沿着射孔方向扩展,形成横向射孔之间的贯通缝, 最终裂缝从试件表面中部起裂扩展延伸至两端。研究结果 可为定向射孔切顶卸压设计与施工提供一定的参考依据。 关键词:定向射孔;射孔间距;注液速率;声发射监测;射孔贯

通缝

中图分类号:TD322 文献标识码:A 文章编号:1005-2763(2023)09-0091-08

引言

切顶卸压沿空留巷技术已经成为无煤柱开采的 主要技术措施之一,受到越来越多的矿业工程技术 人员重视。现阶段常用的切顶卸压的方法包括预裂 爆破、深孔爆破、水力致裂、预制顶板裂隙等[1-4]。随 着矿井开采深度的增加,煤层的集中应力也会增加, 巷道会出现冲击地压、围岩变形等突出问题[5-7],而 定向射孔压裂作为一种新型的压裂方式,可以很好 地把控裂缝的扩展,解决裂缝难以扩展等问题,实现 裂缝定向扩展,有利于提高切顶卸压效果。

近年来诸多学者对射孔压裂展开了大量研究。

姜浒等[8]研究了定向射孔对裂缝扩展及裂缝形态的 影响,结果表明,定向射孔角度与起裂压力成正比。 杨永明等[9]运用各种监测手段研究不同射孔参数对 砂岩水力压裂裂缝扩展规律的影响,结果表明,射孔 深度、方位角控制裂缝扩展方向。张儒鑫等[10]通过 真三轴水力压裂模拟试验,发现射孔之间的连通性 与射孔间距有很大关系,减小射孔间距有利于裂缝 沟通。吴拥政等[11]通过真三轴水力压裂试验,结合 CT 扫描,研究砂岩横向切槽裂缝的扩展规律,揭示 了裂缝由预制切槽起裂扩展的复杂多样性。姜玉龙 等[12]利用真三轴压裂渗流模拟装置,通过分析声发 射事件累计数的占比,研究了煤岩组合体跨界面扩 展规律,创建了跨界面扩展模型。刘正和等[13]利用 真三轴压裂试验平台研究了不同预制裂缝角、注液 速率对水力裂缝扩展规律的影响,结果表明预制裂 缝有定向作用。任晓凯等[14]根据声发射特征将不 同预制裂缝角下紫砂岩的水力压裂过程分为3个阶 段。范铁刚等[15]研究注液速率及压裂液黏度对水 力裂缝形态的影响,结果表明,注液速率小时裂缝复 杂,注液速率大时裂缝单一。刘乃震等[16]基于真三 轴水力压裂模拟系统,探究射孔参数、水平应力差对 致密砂岩多裂缝扩展形态的影响。雷鑫等[17]研究 不同射孔间距、射孔密度等条件下水力压裂裂缝起 裂与扩展的规律。邓金根等[18] 通过试验并结合模 拟,揭示了不同射孔方式和射孔参数对裂缝扩展和 起裂压力的影响规律。龚迪光等[19]通过在 ABAQUS 模拟软件上编写扩展有限元程序,模拟 了起裂压力、裂缝长度与射孔参数和注液速率之间 的关系。

随着射孔压裂技术的不断发展和创新,未来射

^{*} 收稿日期:2022-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52104097,51904197,51974194):山西省基础研究计划项目(20210302124352,20210302123147). 作者简介:丁一(1997一),男,山西临汾人,硕士研究生,主要研究方向为矿山压力与岩层控制,E-mail:645735219@qq.com。

通信作者:张东峰(1964—),男,山西临汾人,硕士,副教授,主要研究方向为采矿系统工程、采矿 CAD, E-mail: dfzhang@163.com。

孔压裂技术的应用会越来越广泛。鉴于上述研究成果,本文将定向射孔压裂技术应用于煤矿切顶卸压,通过大尺寸真三轴水力压裂试验装置结合声发射监测系统,研究定向射孔多孔同步压裂裂缝交互扩展的规律。以期为定向射孔切顶卸压提供一定的参考依据。

1 水力压裂试验设计

1.1 试验设备

试验采用太原理工大学原位改性教育部重点实

验室的 TCHFSM-I型大尺寸真三轴压裂渗流模拟装置,如图 1 所示。整套试验系统包含 4 部分:压力加载系统、水泵注人系统、数据分析与采集系统、声发射系统。其中,压力加载系统由试件放置平台和油缸构成,最大可以容纳 400 mm 的立方体试件。泵送控制系统由高精度油泵控制三轴压力,通过伺服控制阀,可以保证试验过程中对试件进行恒定加载。该装置最大加载载荷为 3000 kN,加载精度为 0.01 kN/s,泵送注入分为水力注入和气体加压两部分。

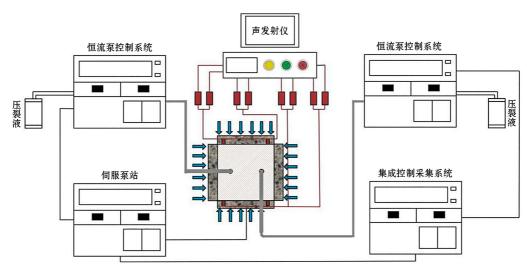


图 1 TCHFSM- I 型大尺寸真三轴压裂渗流模拟试验装置

1.2 试件制备

根据实际地质条件,使用砂岩作为压裂试件,模拟煤层坚硬顶板。选用 300 mm 的立方体砂岩试件。在试件表面钻孔,并预制射孔,然后在钻孔孔壁面涂抹防水剂,具体加工步骤如下。

- (1) 选取表面光滑、无破损的砂岩立方体试件。 用大型台钻和专门定制的合金加长钻头在试样表面 钻取两个间距不同的直径为 10 mm,深为 200 mm 的深孔,模拟井筒。
- (2) 在试件两侧垂直于钻孔的方向上钻出直径为 4 mm,长度可变的深孔,以控制试件横向射孔间距,模拟射孔。
- (3) 用丙酮、酒精清洗钻孔和射孔,待干燥后用 7102 环氧树脂胶将试件两侧裸孔密封。
- (4) 用外径为 6 mm,内径为 4 mm,长为 200 mm 的钢质注液管结合 7102 环氧树脂胶进行封孔,在注液管的下部留有 125 mm 的裸眼井段,模拟压 裂时该井段射孔中形成的初始裂缝。

试验中对实际情况进行简化,试件三维模型如图 2 所示。 $\sigma_{\rm H}$ 、 $\sigma_{\rm h}$ 分别为最大水平主应力和最小水平主应力, $\sigma_{\rm v}$ 为轴向应力。

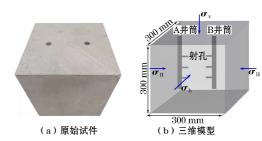


图 2 试验试件及试件三维模型

1.3 试件基本力学参数

对标准砂岩试件开展单轴及三轴压缩试验,测得的基本力学参数见表1。

表 1 试件砂岩物理力学参数

单轴抗压	抗拉强度/	泊松比	弹性模量/	断裂韧度/
强度/MPa	MPa		GPa	(MPa・m ^{1/2})
73.1	7.8	0.17	10.4	1.2

1.4 试验方案

将试样放入压裂平台后,连接声发射装置,本次试验外接8个直径为15 mm的声发射探头,声发射探头布置位置如图3所示。声发射监测系统前置信号放大器为40 dB,信号采样频率为10 MHz,谐振频率为20~100 kHz。为减小外部因素对试验结果的影响,将声发射探头埋制于试件表面的钻孔中。具体步骤如下:在试件的顶点处钻取声发射孔;在钻孔表面涂抹一层凡士林后,将声发射探头置于钻孔中;固定探头,然后安装传压板和压机的其他部件。

在传压板与试件中间放置橡胶垫片,以保证在试件表面均匀加载。整个试验过程分为 6 步,首先将试件放置于压裂平台;连接声发射装置;放置传压板;将 3 个方向的力统一加载至最小水平主应力 (σ_h) 设定值;再加载 σ_v 、 σ_H 至最大水平主应力 (σ_H) 设定值;最后将 σ_v 缓慢加载至轴向载荷设定值。待试件周围的应力稳定后进行压裂试验。

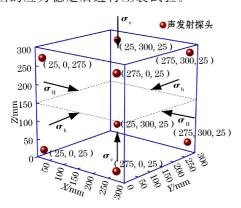


图 3 声发射探头布置

为便于观察试验结果,在搅拌压裂液时加入适量细盐,防止水分的快速蒸发。同时结合试验的实际条件及相似准则的参数选取要求,取 $\sigma_v=15$ MPa,模拟垂向地应力; $\sigma_H=8$ MPa, $\sigma_h=5$ MPa,分别模拟最大水平地应力和最小水平地应力。具体试验方案见表 2。

表 2 砂岩试件定向射孔同步压裂试验方案

试件编号	横向射孔 间距/mm	注液方式	注液速率/ (mL·min ⁻¹)	
1 #	40	恒流	30	
2 #	60	恒流	30	
3 #	80	恒流	30	
4 #	100	恒流	30	
5 #	80	恒流	10	
6 #	80	恒流	50	

压裂试验前,对真三轴定向水力压裂试验系统

进行调试,包括注液管路的排空、声发射系统的频率调试、泵注系统的初始注液压力设置等。

2 试验结果及分析

首先依据水力压裂裂缝在试件表面的形态初步 判断裂缝的扩展行为,然后通过注液压力与声发射 监测进行相应的分析验证。声发射是研究裂缝演化 过程的有效手段,能有效监测试件内部裂缝的发展 和贯通。

不同条件下的试件破坏及声发射三维定位重演如图 4 所示,其中左图是压裂试验后的实物图,右图是各试件 AE 事件的空间分布(红色球体代表 AE 事件,绿色散点为 AE 事件在 X-Y 面的投影,见电子版)。通过观察对比可知,声发射事件的分布规律与水力压裂裂缝扩展形态呈现良好的对应关系。

2.1 从试件破坏形态对比分析裂缝扩展规律

对比观测 1[#]、2[#]、3[#] 试件的破坏形态及声发射事件空间分布三维图,可以发现,当横向射孔间距小于 80 mm 时,裂缝沿射孔定向扩展,贯通后从试件的中间起裂,再延伸至试件两端。而 4[#] 试件由于横向射孔间距大,定向射孔之间未能贯通,最终裂缝在两侧扩展,试件表面也未能形成一条完整的贯通裂缝。5[#] 试件的注液速率最小(10 mL/min),定向射孔之间也未能贯通形成完整的贯通裂缝,裂缝在试件两侧扩展。6[#] 试件的注液速率最大(50 mL/min),不仅定向射孔之间贯通形成完整的贯通裂缝,而且裂缝最长,无明显偏转。观测试件裂缝,发现部分裂缝虽发生一定的偏转,但裂缝最终会沿着最大水平主应力、垂直于最小水平主应力的方向扩展,这是由试验所用砂岩的层理方向所导致的。

2.2 从声发射事件空间分布对比分析试件裂缝扩 展规律

对比声发射事件空间分布图能看出不同条件下 裂缝沿定向射孔扩展的情况,1[#]、2[#]、3[#] 试件随着 横向射孔间距的不断增大,裂缝长度不断增加,裂缝 宽度不断减小,二者呈反比关系。原因是在同一注 液速率下,当横向射孔间距小时,单位定向射孔贯通 缝面积的注液压力大于试件本身抵抗破坏的最大强 度,裂缝就会扩张变宽并且衍生出次生裂缝以平衡 注液压力。所以在同一注液速率下,横向射孔间距 越小,贯通裂缝的宽度越大,裂缝就会在两井筒间垂 直于最小水平主应力方向上无序扩展。由此可知, 在一定范围内,随着横向射孔间距的增大,裂缝逐渐 呈现出定向射孔的横向相对扩展,裂缝更细更长。

对比 3[#]、5[#]、6[#] 试件,当注液速率为 10 mL/min 时,定向射孔之间的主裂缝未贯通,而在 30 mL/min、50 mL/min 的注液速率下,试件的定向射孔之间的主裂缝均已贯通,并且在 50 mL/min 的注液速率下裂缝更长、更直,分支更少、更单一。这是因为 10 mL/min 注液速率下的单位时间内压力上涨率较

30 mL/min、50 mL/min 注液速率下的小,所以注液速率越大,裂缝的扩展率越高,冲击力越大,裂缝越平直,分支越少,裂缝越单一。

从声发射观测的 AE 事件数量分布来看,随着横向射孔间距的增大,声发射事件发生数越多,裂缝越多,缝网面积越大。随着注液速率的增加,声发射事件数越少,裂缝更加平直,缝面更平整。

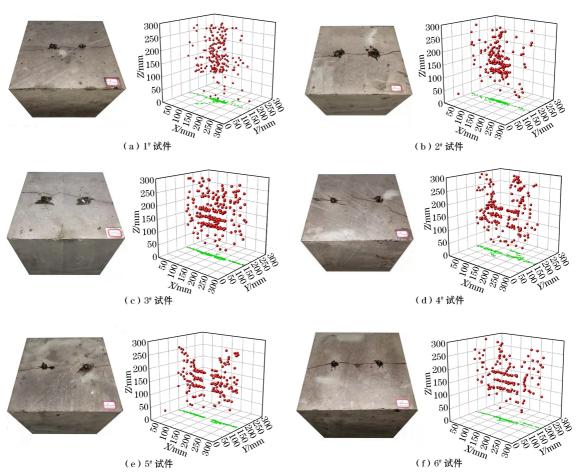


图 4 不同条件下试件破坏及声发射三维定位重演

3 定向射孔裂缝扩展分析

整理分析试验数据,绘制不同压裂条件下各井 筒注液压力及声发射演化规律图(见图 5)。对试件 的起裂、内部裂缝扩展形态、射孔间交互扩展规律进 行综合分析。其中,声发射能量可以很好地反映压 裂过程中试件内部结构的演化规律。

3.1 声发射能量分析

在整个水力压裂过程中,开始注水后,由于滤失效应,在压裂初期注液压力和声发射能量无明显上升,整个过程比较平稳。随着注水量的增加,注液压力稳步上升,此时砂岩内部未产生明显裂缝,试件处

于空隙密压阶段。当注液压力达到峰值时,裂缝起裂,声发射能量大幅上升。而后注液压力急剧下降, 声发射能量也急速下降,且频繁波动,表明裂缝在不断扩展;经过有规律的波动之后,最终形成完整的渗流通道。

3.2 注液压力曲线对比分析

1[#] 试件的 A、B 井筒压力时间曲线在裂缝扩展 阶段并未保持一致,是因为 A 井筒裂缝在扩展至阶 段末时,已形成完整的渗流通道,而 B 井筒由于裂 缝扩展不足,一直处在憋压阶段,无法打开完整的渗 流通道。2[#] 试件在裂缝扩展阶段时,A、B 井筒的注 液压力并未保持一致,是因为该试件的天然裂隙不均 匀,A、B 井筒形成完整的渗流通道时,A 侧的裂缝窄

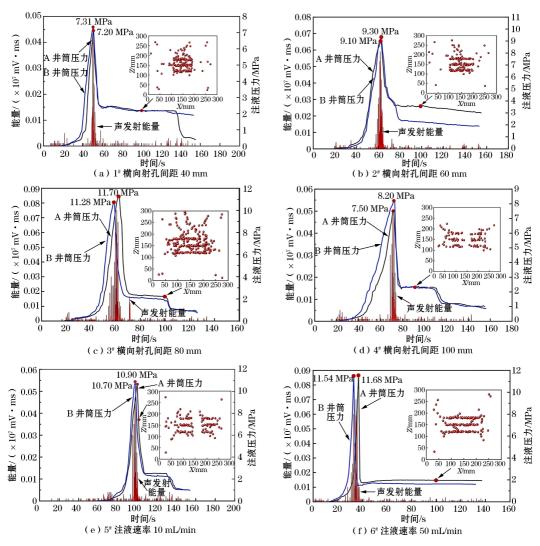


图 5 不同压裂条件下各井筒注液压力及声发射演化规律

排除试验以及设备误差,观测到不同条件下同一试件中A、B 并筒的起裂时间、裂缝扩展、压力时间曲线基本保持一致。不同条件下的各试件起裂压力见表3。

表 3 不同条件下各试件的起裂压力

试件编号	A 井筒起裂 压力/MPa	B 井筒起裂 压力/MPa	平均起裂 压力/MPa
1 #	7.2	7.31	7.255
2 #	9.1	9.3	9.2
3 #	11.7	11.28	11.49
4 #	7.5	8.2	7.85
5 #	10.7	10.9	10.8
6 #	11.68	11.54	11.61

因 A、B 井筒的起裂压力在允许的范围内基本一致,所以取起裂压力平均值加以研究。对比 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]试件可知,横向射孔间距由 40 mm 增加

至 60 mm 时,试件的起裂压力由 7.255 MPa 增加至 9.2 MPa,上升了 26.8%;由 60 mm 增加至 80 mm 时,试件的起裂压力由 9.2 MPa 增加至 11.49 MPa,上升了 24.9%。而 4[‡] 试件由于试件大小的限制,定向射孔之间的裂缝并未贯通,裂缝从试件两侧开始起裂,所以暂不考虑。因此可以认为,在一定范围内,横向射孔间距的增加对砂岩试件的起裂压力影响幅度较大。

而长,分支较少,B侧的裂缝较宽,分支较多。

对比 3^{*}、5^{*}、6^{*}试件可知,注液速率由 10 mL/min 增加至 30 mL/min 时,试件的起裂压力由 10.8 MPa 增加至 11.49 MPa,上升了 6.4%。注液速率由 30 mL/min 增加至 50 mL/min 时,试件的起裂压力由 11.49 MPa 增加至 11.61 MPa,上升了 1%。因此可以认为,注液速率的增加对砂岩试件的起裂压力影响幅度较小。

3.3 不同条件下定向射孔裂缝扩展分析

对比 1 * 、2 * 、3 * 、4 * 试件 100 s 时裂缝扩展阶 段的声发射事件 X-Z 投影面,可以看出当横向射孔 间距为 40 mm 时,有横向射孔的定向扩展,还有纵 向射孔间的垂向扩展,定向射孔横向贯通,裂缝较 宽,呈无规则交互扩展。裂缝持续扩展后最终从试 件的中间开始起裂,是因为当横向间距过小时,射孔 与井筒、射孔与射孔之间的应力集中程度增大,孔间 干扰增大。当横向射孔间距为 60 mm 时,定向射孔 裂缝增长形成完整的贯通缝,但裂缝分支开始减少, 裂缝持续扩展后,最终从试件的中间开始起裂。当 横向射孔间距为 80 mm 时,裂缝更长且明显变细, 试件表面的裂缝缝网面积显著增大,裂缝持续扩展 后,最终从试件的中间开始起裂。当横向射孔间距 为 100 mm 时, 横向射孔未贯通, 每簇射孔纵向打 开,裂缝从试件两侧起裂。因此,裂缝长度、裂缝缝 网面积随 A、B 井筒横向射孔间距的增大而增大,裂 缝宽度随间距的增大而减小。

对比 3[#]、5[#]、6[#] 试件,可以看出不同注液速率 对定向射孔裂缝交互扩展的影响。当注液速率为 10 mL/min 时,定向射孔未能贯通,裂缝在两侧扩 展。当注液速率为 30 mL/min 时,形成一条完整的 贯通缝,主裂缝两侧有些许的分支裂缝。当注液速 率为 50 mL/min 时,形成一条完整的贯通缝,且裂 缝更长,分支更少,缝面更平整。因此可以得出结 论:在不同注液速率下,随着注液速率的增加,裂缝 宽度越小,裂缝分支越少,裂缝越长,缝面更平整。

3.4 不同阶段定向射孔多孔压裂裂缝交互扩展 分析

以3*试件为例,为观测整个压裂过程中裂缝定向射孔交互扩展规律,选择压裂过程中不同阶段的声发射 AE 事件的 X-Z 面投影图进行全面分析。如图 6 所示, I 点为砂岩起裂点、II 点为主裂缝打开点、II 点为压裂完成。各特征点的 AE 事件分布见图 7。在定向射孔多孔同步压裂初期,裂缝从各射孔端部起裂,井筒和射孔周边出现微裂隙。随着压裂的进行,射孔端部的裂缝变得复杂,主裂缝会沿着定向射孔方向扩展,随后各射孔孔眼裂缝发生不同程度的拼接合并后,形成射孔贯通裂缝。裂缝继续延伸最终从试件中间起裂,压力大幅度下降,主裂缝打开。随着裂缝的进一步扩展,次生裂缝也逐步延伸至试件表面,最终形成了贯通整个试件的横向主裂缝。此时所有的渗流通道均打开,次生裂缝不再

产生,注液压力维持在一个较低水平,压裂完成停止 注水。

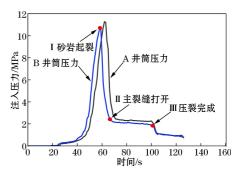


图 6 压裂过程中不同阶段裂缝演化规律

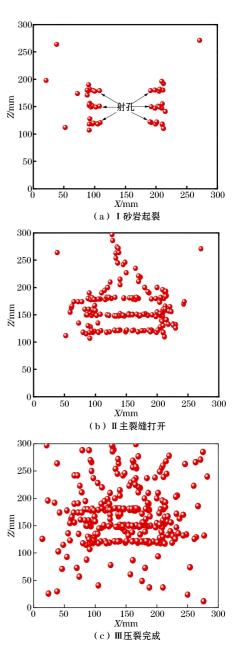


图 7 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ点的 AE 事件分布

4 结论

- (1) 声发射观测的 AE 事件分布图能很好地反映出水力压裂过程中,每个阶段的裂缝扩展形态和起裂规律。声发射能量与压力时间曲线变化趋势一致,也能够反映出试件内部结构的动态变化。
- (2) 横向射孔间距对裂缝扩展形态影响较大, 裂缝长度、起裂压力和裂缝缝网面积随着横向射孔 间距的增大而增大,裂缝宽度随着间距的增大而减 小。在一定范围内,随着间距的增大,裂缝逐渐呈现 出规律的相对扩展。横向射孔间距越小,应力阴影 作用增强,孔间干扰增大,会出现射孔间裂缝的无规 则交互扩展,不利于裂缝的定向扩展。
- (3) 随着注液速率的增加,主裂缝产生的次生 裂缝减小,裂缝偏移现象也减少,复杂的裂缝也变得 单一,裂缝更平直,缝面更平整。
- (4) 在压裂初期,裂缝从各射孔端部起裂。随着压裂的进行,射孔端部的裂缝变得复杂,主裂缝会沿着定向射孔方向扩展,在各射孔孔眼裂缝发生不同程度的拼接合并后,试件内部形成射孔贯通裂缝。随着裂缝的进一步扩展,最终裂缝由试件表面中部起裂,扩展延伸至两端。

参考文献(References):

- [1] 王巨光,王刚.切顶卸压沿空留巷技术探讨[J].煤炭工程, 2012(1):24-26.
- [2] 王维维,李凤义,兰永伟.切顶卸压沿空留巷技术研究及应用[J].黑龙江科技大学学报,2014,24(1);20-23.
- [3] 张盛,王小良,吴自强,等.切顶卸压沿空留巷爆破孔关键参数选择及留巷效果现状分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(6):1-9.
- [4] 汤建泉,刘吉存,宋文军,等.切顶卸压沿空留巷预裂切缝技术指标研究[J].煤炭技术,2017,36(6):174-176.

- [5] 何满潮,陈上元,郭志飚,等.切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):959-969.
- [6] 马资敏,郭志飚,陈上元,等.深部中厚煤层切顶留巷围岩变形规律与控制研究[J].煤炭科学技术,2018,46(2):112-118+242.
- [7] 李浩荡.浅埋深工作面冲击地压切顶卸压效果监测分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2013,32(2),141-144.
- [8] 姜浒,陈勉,张广清,等.定向射孔对水力裂缝起裂与延伸的 影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7),1321-1326.
- [9] 杨永明,李霄,汪震,等.射孔参数对非均质砂岩水力压裂裂缝扩展规律的影响[J].土木工程学报,2022,55(1):1-9.
- [10] 张儒鑫,侯冰,单清林,等.致密砂岩储层水平井螺旋射孔参数优化研究[J].岩土工程学报,2018,40(11);2143-2147.
- [11] 吴拥政,杨建威.煤矿砂岩横向切槽真三轴定向水力压裂试验[J].煤炭学报,2020,45(3):927-935.
- [12] 姜玉龙,梁卫国,李治刚,等.煤岩组合体跨界面压裂及声发射响应特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38 (5):875-887.
- [13] 刘正和,杨录胜,廉浩杰,等.砂岩钻孔轴向预制裂缝定向压 裂试验研究[J].煤炭学报,2019,44(7);2057-2065.
- [14] 任晓凯,刘正和,杨录胜,等.不同预制裂缝角下紫砂岩的水力压裂声发射研究[J].矿业研究与开发,2019,39(9):66-69.
- [15] 范铁刚,张广清.注液速率及压裂液黏度对煤层水力裂缝形态的影响[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38 (4):117-123.
- [16] 刘乃震,张兆鹏,邹雨时,等.致密砂岩水平井多段压裂裂缝 扩展规律[J].石油勘探与开发,2018,45(6):1059-1068.
- [17] 雷鑫,张士诚,许国庆,等.射孔对致密砂岩气藏水力压裂裂缝起裂与扩展的影响[J].东北石油大学学报,2015,39(2):94-101+11.
- [18] 邓金根,郭先敏,孙焱,等.致密气藏压裂井定向射孔优化技术[J].石油钻采工艺,2008,30(6),93-96.
- [19] 龚迪光,曲占庆,李建雄,等.基于 ABAQUS 平台的水力裂缝 扩展有限元模拟研究[J].岩土力学,2016,37(5):1512-1520.

Study on the Interactive Propagation Law of Fracture in Directional Perforation Porous Synchronous Fracturing Technology

DING Yi, ZHANG Dongfeng, ZHANG Xiaoqiang, JIANG Yulong, WANG Kai

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: For the traditional top-cutting and pressure-relieving goal-side roadway retention technology, it is difficult to control roof deformation and collapse. In order to better master the fracture propagation law of roof during top-cutting and pressure-relieving, a scheme of top-cutting and pressure-relieving by directional perforation porous synchronous fracturing was proposed and tested. In the process of traditional fracturing test, perforation spacing and liquid injection velocity have great impacts on the effect of fracture propagation. By combining the true triaxial fracturing seepage simulation test system with the acoustic emission monitoring system, a group of 300 mm cube sandstone specimens were used for simulation test. The results show that the acoustic emission (AE) event distribution map of acoustic emission monitoring can well reflect the fracture propagation morphology and fracture propagation law of each stage in the fracturing process of the specimen. The fracture length, initiation pressure and fracture mesh area increase with the increase of transverse perforation spacing, while the fracture width decreases

with the increase of perforation spacing. With the increase of liquid injection velocity, the secondary fractures produced by the main fracture reduce, the phenomenon of fracture migration also reduces, and the complex fractures become single. In the initial stage of fracturing, the fracture starts from each perforated end. With the progress of fracturing, the fracture at the perforated end becomes complicated. The main fracture will expand along the perforated direction to form connected fracture between transverse perforations. Finally, the fracture starts from the middle of the specimen surface to extend to both ends. The research results can provide some reference for the design and construction of directional perforation top-cutting and pressure-relieving.

Key words: Directional perforation, Perforation spacing, Liquid injection velocity, Acoustic emission monitoring, Perforation connected fracture