

DOI: 10.11779/CJGE201503017

煤层超高压定点水力压裂防冲试验研究

姜福兴¹, 王博¹, 翟明华², 郭信山², 黄广伟¹, 黄俊锐¹

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 针对国内外没有成熟的区域主动防冲技术的现状, 介绍了一种采用超高压定点压裂煤层形成区域性低应力区, 从而为快速掘进和回采创造条件的新技术。现场试验在采深 1000 m 的山东省华丰煤矿进行, 采用微地震监测煤岩体破裂、应力动态实时监测系统监测煤岩体应力变化和压力传感器监测管路压力, 实现试验全过程监测。试验得到的主要结论如下: ①压裂的压力达到 24 MPa 并持续 11 s 之后, 煤体产生初次破裂, 持续 13 min 后压裂半径达到 8 m; ②压裂过程中压裂点附近煤体应力动态为: 管路加压后距离压裂点 9.5 m 的煤层内应力值明显升高—煤体产生破裂并产生微震—管路压力骤降—测点应力趋于稳定; ③压裂过程中将煤体切割成了近似 $6.2 \text{ m} \times 8.0 \text{ m} \times 6.2 \text{ m}$ 的长方体, 同时随着大量水的注入有效降低了煤体的冲击倾向性; ④试验证明定点压裂能够实现“转移应力、弱化煤体和降低蓄能”的防冲机理。

关键词: 水力压裂; 定点; 防冲; 冲击地压; 微震; 应力

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)03-0526-06

作者简介: 姜福兴(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力与岩层控制、微震监测工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangfuxing1@163.com。

Field tests on fixed-point hydraulic fracture with extra-high pressure in coal seam for rock burst prevention

JIANG Fu-xing¹, WANG Bo¹, ZHAI Ming-hua², GUO Xin-shan², HUANG Guang-wei¹, HUANG Jun-rui¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Shandong

Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: Considering the current domestic and overseas situations of lacking mature active regional technology for rock burst prevention, a kind of new technology is introduced using fixed-point hydraulic fracturing with ultra-high pressure to form regional low stress areas in coal body for facilitating rapid excavation and mining. The field tests are carried out at the mining depth of about 1000 m in Shandong Huafeng Coal Mine. In order to monitor the whole process of the tests, microseismic monitoring system, stress dynamic real-time monitoring system and pressure sensors are used to monitor coal and rock fracture, stress variation in coal and rock and line pressure, respectively. The main conclusions are as follows: (1) After the fracture pressure reaches 24 MPa and remains for about 11 seconds, the first fracture occurs in the coal, and then the fracture radius reaches 8 m when the pressure stays at the same level for around 13 minutes; (2) The stress performance of time sequence in the whole fracture process is that: the stress of the observation point 9.5 m away from the fracture point increases significantly after the water is pressurized → fracture occurs in the coal → line pressure plunges → stress at the observation point tends to be stable; (3) The fracture process approximately cuts the coal into cuboids of $6.2 \text{ m} \times 8.0 \text{ m} \times 6.2 \text{ m}$, and reduces coal burst tendency effectively with the injection of a great deal of water; (4) The tests show that the fixed-point hydraulic fracture can achieve rock burst prevention by means of “stress transfer, coal weakening and energy storage decrease”.

Key words: hydraulic fracture; fixed point; rock burst prevention; rock burst; microseism; stress

0 引言

水力压裂技术作为石油和页岩气开发增产的主要手段, 在国内外已得到了广泛应用^[1-2], 其作用机理为通过高压将压裂液注入岩层中, 人为地制造大量裂缝, 改变岩体的物理力学性质, 增大岩层的渗透性, 从而

提高油气的产量。随着水力压裂技术的不断成熟, 其在煤炭领域也得到了初步应用, 主要用于煤层气增透、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274022, 51174016); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB226803); 中国博士后科学基金面上项目(2014M560892)

收稿日期: 2014-08-16

坚硬顶板控制、坚硬顶煤的注水防冲、煤与瓦斯突出的区域性防治等^[3-5]。

冲击地压作为矿山深部开采的主要动力灾害, 已成为迫切需要解决的关键科学问题与世界性难题^[6-7]。目前, 国内外防治冲击地压的主要手段是煤层钻孔卸压、爆破卸压、注水、断顶等“局部防冲”技术^[8-11], 尽管取得了一定效果, 但“局部防冲”技术工程量浩大、成本高、人为影响大、卸压效果不能保证, 且开采前的区域性防冲尚无行之有效的方法。

目前常规煤层注水压力通常在 20 MPa 以下, 属于低压至高压范围内, 不同的注水压力可起到不同的作用, 如煤层注水防尘和软化的注水压力为 0~12 MPa^[12-13], 煤与瓦斯突出防治注水起裂压力一般小于 20 MPa^[14-15]。由于冲击地压矿井煤层强度普遍较高, 常规煤层注水压力无法充分压裂煤层, 而现有的煤层水力压裂防冲技术均为漫灌式压裂^[16-18], 容易造成局部卸压和局部应力集中的情况, 防冲效果不理想。因此为实现掘进前对冲击危险煤层的区域性卸压, 主动控制煤层的压裂位置和压裂程度, 提出煤层超高压定点水力压裂技术, 注水压力达到 20 MPa 以上, 进行多次分段定点压裂, 以形成区域性低应力区, 从而为快速掘进和回采创造条件。

本文以华丰煤矿 1412 工作面为工程背景, 在煤层超高压定点水力压裂试验过程中采用压力传感器监测现场试验过程中管路压力变化, 判断煤层是否压裂; 采用应力动态实时监测系统和微地震监测系统现场实测煤层超高压定点水力压裂的防冲效果, 进而为煤层超高压压裂合理参数的确定及后续防冲措施的制定提供依据。

1 水力压裂的防冲机理

水力压裂防治冲击地压的机理主要为应力高峰转移、冲击倾向性弱化和减小蓄能体单元体积以减弱蓄能能力 3 个方面。

(1) 促使应力高峰向煤体深部转移

煤层超高压水力压裂使得压裂区域及压裂影响半径范围内的煤体内部形成大量裂缝, 裂缝面的存在导致其附近的应力降低, 高应力向周围转移, 促使应力再分布, 宏观表现为在压裂孔附近形成卸压区, 再往外是应力升高区。因此, 通过对冲击危险煤层进行大范围超高压定点水力压裂, 可实现应力定点转移, 达到一次性卸压。

(2) 煤岩体注水软化减冲

注水压裂过程中, 随着大量水的注入, 煤岩体的性质将发生改变, 其对煤岩体性质的改变主要体现在以下 3 个方面: ①通过水力压裂产生的大量裂缝改变

煤岩体的宏观和微观结构, 降低煤岩体的整体强度; ②煤岩体饱水状态下, 会形成“三低一强”状态, 即弹性模量降低、抗压强度降低、结构面的黏结力降低和塑性增强, 从而降低冲击倾向性; ③由于煤体的塑性增强, 塑性区吸收剩余能量的能力增强, 其积聚弹性能的能力下降, 从而达到防治冲击地压的目的。

(3) 减小蓄能体单元体积以减弱蓄能能力

将整体煤层压裂成预定的“小块”, 并形成结构面, 当外部压力增加时, 小块煤体将沿压裂形成的结构面滑动, “均化”应力从而实现能量的传递与扩散, 实现“通过压裂减小蓄能体单元体积, 减弱蓄能能力”的防冲机理。

2 煤层超高压定点水力压裂现场应用

2.1 试验地点概况

压裂试验地点为华丰煤矿 1412 综放工作面下平巷, 其位于井田的中东部, -1100 水平一采区四区段。上为 1411 综放工作面采空区, 下为尚未开采的 1413 工作面, 走向长度 2160 m, 倾斜长度 154 m, 平均采深近 1170 m。工作面采用后退式综采放顶煤采煤法, 全部垮落法管理顶板。工作面采高 2.4 m, 循环进尺为 0.6 m; 放煤高度 3.8 m, 放煤方式采取两刀一放, 放煤步距为 1.2 m。工作面开采的四煤层平均厚 6.2 m, 可采指数为 1, 煤厚变异系数 28%, 为较稳定煤层, 煤层倾角平均 32°, 硬度系数 $f=1.5\sim2.5$, 视密度 1.31 t/m³, 单向抗压强度 10.8~25.5 MPa, 自然含水率 2%, 孔隙率 4.38%。煤层为强冲击倾向, 直接顶为弱冲击倾向, 直接底为强冲击倾向。1412 综放工作面煤层顶底板条件如表 1 所示。

表 1 煤层顶底板情况表

Table 1 Roof and floor of coal mine

顶底板 名称	岩石 名称	厚度 /m	岩石特征
煤 4 顶 板	细砂 岩	1.90	灰白色, 石英长石为主, 夹暗色矿物, 泥质胶结, 有炭化面, 断续状水平层理, 底部为钙质砂岩
	粉砂 岩	4.40	黑灰色, 块状结构, 含丰富植物化石, 具炭面、内夹砂质泥岩, 黄铁矿薄膜
	细砂 岩	16.60	白色, 以石英为主, 含云母碎片, 泥质胶结较硬, 具方解石细脉, 缓波状层理, 具有炭面
	砂质 泥岩	4.42	黑灰色, 块状构造, 性脆, 含植物化石, 呈滑面
煤 4 底 板	粉砂 岩	0.71	黑色, 夹炭质条带, 沿层面有黑色片状矿物
	灰岩	4.19	石灰岩(十下): 深灰色, 性脆, 致密, 隐晶质结构, 具缝合线, 裂隙方解石脉充填, 富含蜓科化石

2.2 水力压裂试验过程

本次压裂试验共布置3个压裂钻孔，间距8 m，如图1所示，“#1孔深度为38.9 m，孔径为94 mm，“#2和#3孔深度60 m，孔径65 mm。压裂泵公称压力为31.5 MPa、公称流量为315 L/min。高压管路选用Φ32 mm和Φ25 mm的高压胶管，采用专用封孔器封孔，压裂段前后各封2.2 m，压裂段长度0.9 m。封孔器抗压强度为40 MPa，外径55 mm，可在孔内按设计压裂要求前后滑动，从而实现将整体煤层压裂成预定的“小块”；封孔器以外用无缝钢管连接至孔口，采用快速接头与高压胶管相连接。

3个压裂孔共进行了4次压裂试验，其中“#1孔试验压裂段中心距孔口21.89 m，“#2孔进行了2次试验，第一段距孔口28.6 m，将封孔器往外撤出6.2 m之后进行第二段压裂，第二段距孔口22.4 m，“#3孔进行了一次试验，压裂段中心距孔口21.73 m。试验步骤基本相似，先向封孔器内注高压水，使其压力达到30 MPa并且保压，然后向压裂段内注入高压水，当水压达到一定值后，煤岩体中出现裂缝，压力降低，继续向压裂段注水，使压裂段周边已形成的裂隙继续扩展并形成新的裂缝。每次升压后稳定一段时间，之后压力迅速降低，证明产生一次压裂，如果持续加压时压力无明显上升，说明已完成压裂并停泵、关闭泄压阀，试验结束。

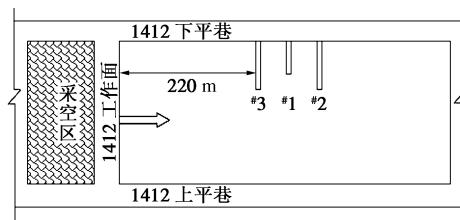


图1 钻孔布置位置示意图

Fig. 1 Layout of hydraulic fracture boreholes

2.3 监测系统布置

图2为现场管路连接示意图，在高压注水压裂管道上放置一个压力传感器，实时监控高压注水管路内压力的变化，以此判断煤层是否压裂。

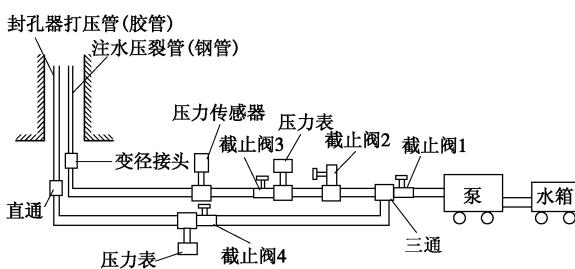


图2 现场管路连接示意图

Fig. 2 Tube connection of test ground

煤层被压裂后，其完整性受到破坏，应力峰值向压裂区域两侧转移，通过在压裂孔两侧布置应力计，观察压裂过程中应力的转移过程，判断压裂的影响范围。图3为压裂孔附近应力动态实时监测系统布置图。从图中可以看出，在压裂孔周围布置了6个测点，埋深均为20 m，两侧测点间距分别为4 m。

压裂引起煤体瞬间破裂并产生微震事件，不同应力状态和性质的煤岩体，其微震事件和能量大小是不同的。本次试验采用北京科技大学姜福兴教授团队研发的KJ551高精度微地震监测系统对水力压裂前后的微震事件进行了监测。图4为微地震监测系统布置图。从图中可以看出，压裂孔周围共布置6个检波器，埋深不同，通过对水力压裂前后微震事件的对比，确定煤体的破裂程度。

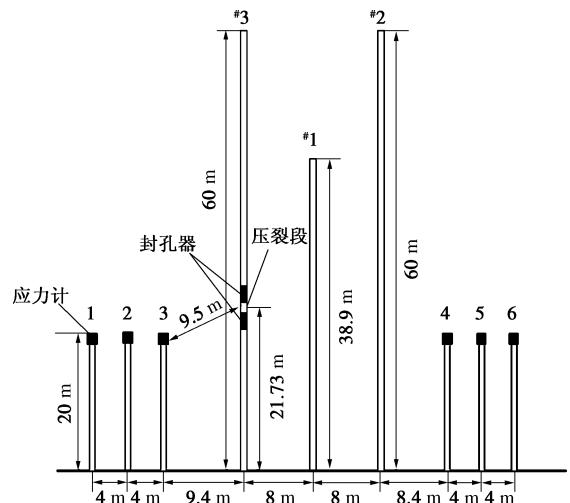


图3 应力动态实时监测系统布置

Fig. 3 Layout of stress dynamic real-time monitoring system

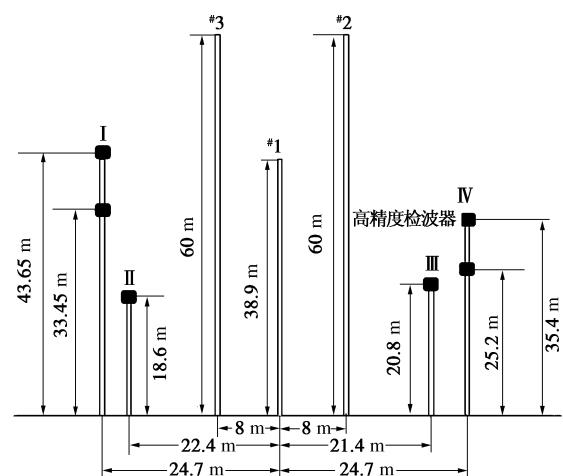


图4 微地震监测系统布置

Fig. 4 Layout of microseismic monitoring system

3 主要监测结果分析

通过分析管路压力、压裂孔两侧煤岩体应力变化

和微震事件判别压裂的效果, 下面以^{#3}孔为例分析试验结果。

3.1 压裂过程中压力显现在时间上的相关性分析

水力压裂过程中, 当水压达到一定值后, 煤体被压裂, 瞬间管路压力降低, 继续向压裂段高压注水, 使压裂段周边已形成的裂隙继续扩展, 并形成新的裂缝。

当煤层被压开后, 钻孔周边煤体内的应力逐渐下降, 超前煤壁支承压力峰值降低, 峰值点位置向煤体深部转移。图5为^{#3}孔煤层水力压裂过程中管路压力和测点3的应力变化曲线, 图6为^{#3}孔压裂过程中现场观测情况, 表2为压裂过程中的微震事件拾取时间和能量。

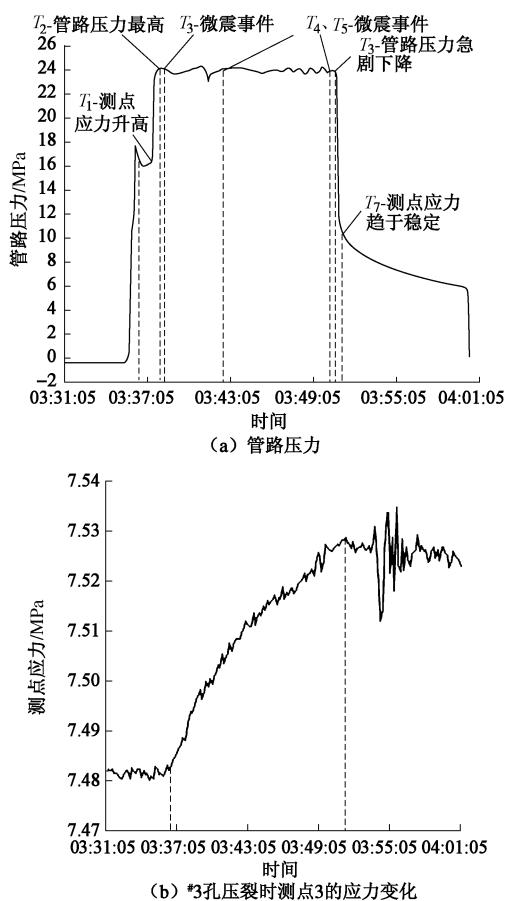


图5 ^{#3}孔压裂过程中管路压力和测点应力变化

Fig. 5 Variation of line pressure and point stress in fracture process of hole No. 3



图6 ^{#3}孔压裂过程中现场观测情况

Fig. 6 Field observations of hole No. 3

从图5中可以看出, T_1 时刻(03:36:55)距离压

裂段9.5 m的测点3应力值出现明显升高, T_2 时刻(03:38:25)管路压力达到最大值(24 MPa), 出现第一次应力降低; T_2 到 T_6 (03:51:05)之间管路压力出现小范围的波动, 说明煤体不断产生裂隙或煤体的原生裂隙在贯通和扩展。因为本次压裂为控制定点压裂, 且注水流量大, 故产生裂隙之后很快裂隙就被水充满, 压力恢复到24 MPa。 T_2 到 T_6 内接收到3次微震事件, 其中 T_3 时刻(03:38:36)微震系统首次接收到微震事件, 说明钻孔附近煤体产生初次破裂。注水压力保持在24 MPa左右, 持续大约13 min后到达 T_6 时刻(03:51:05), 管路压力急剧下降, 压力值降至9 MPa, 说明此时煤层被大范围压开, 产生较大尺度破裂。此时, 现场观察到^{#3}压裂孔内无水流出, 而相邻的^{#1}孔有水流出, 说明^{#3}孔与^{#1}孔贯通, 形成导流, 如图6, 其中左图为^{#3}孔, 右图为^{#1}孔, 两孔相距8 m, 说明压裂半径至少达8 m以上。此时, 继续向^{#3}孔内注入高压水已无意义, 压裂完成, 停泵, 关闭泄压阀, 试验结束。从图5(b)中可以看出, 整个压裂过程中(T_1 至 T_7 (03:51:25))测点3应力持续升高, 约0.05 MPa, 说明煤体应力一直在转移, 直至压裂结束, 趋于稳定。

表2 压裂过程中微震事件到时和能量

Table 2 Arrival time and energy of microseismic events in fracture process

序号	到时	能量/kJ	备注
1	03:38:36	1.870	T_3
2	03:42:36	0.577	T_4
3	03:49:53	0.508	T_5
4	03:56:55	0.169	

综合分析可知: ①压裂压力达到24 MPa持续11 s之后煤体产生初次破裂, 持续13 min后压裂半径达到8 m; ②压裂过程中压裂点附近煤体应力动态为: 管路加压后距离压裂点9.5 m的煤层内应力值明显升高—煤体产生破裂并产生微震—管路压力骤降—测点应力趋于稳定。

3.2 煤层切割块度

在^{#2}压裂孔中进行了两次试验, 第一压裂段距孔口28.6 m, 压裂过程中, 压力表有明显压降, 钻孔附近4号煤层内测点应力有明显升高, 压裂时微震监测到破裂事件, 同时在钻孔附近可听到煤体破裂的声音。在^{#2}孔进行第二次试验时, 将封孔器后撤出6.2 m, 压裂段距孔口22.4 m, 试验开始1 min后, 钻孔内有水流出, 但出水量明显没有注水量大, 分析认为压裂水已进入第一次压裂的裂隙区, 裂缝已经贯通。证明^{#2}孔第一次压裂时在孔的平行方向上压裂范围达到了6 m以上。

在^{#3}孔试验过程中, 从图5(a)可以看出管路压力有明显压降, 产生较大尺度破裂, 从图5(b)中可

以看出测点 3 应力明显升高, 且在压裂时间内持续升高, 说明压裂过程中煤体应力转移范围达到 9.4 m。压裂过程中, 钻孔附近可听到密集的煤体破裂声音, 注水 13 min 后, 高压水从 #1 孔中流出, 如图 6。由于 #1 孔和 #3 孔相距 8 m, 说明此次压裂半径至少达到 8 m。

综合 #2 孔和 #3 孔的试验结果, 考虑到煤层厚度平均 6.2 m, 认为超高压定点水力压裂后, 将煤体切割成了近似 $6.2\text{ m} \times 8.0\text{ m} \times 6.2\text{ m}$ 的长方体, 改变了煤体的宏观结构, 降低了煤体的整体强度, 减小了蓄能体单元体积, 从而减弱了煤体的蓄能能力, 有效地降低了发生冲击危险的可能性。

3.3 煤层注水量

1412 工作面上下平巷常规注水一般采用动压注水, 注水压力不低于 8 MPa, 单孔注水流量 $0.3\sim 2\text{ m}^3/\text{h}$, 根据实际经验取 $1.2\text{ m}^3/\text{h}$, 其注水要求为: 当煤帮在预定的湿润范围内出现均匀的“出汗”现象(从煤帮渗出水珠)后, 如果注水量已达到或接近设计注水量后, 需再注 $1\sim 2\text{ d}$, 如果注水量与设计水量相差大, 需循环重复注水(即停 $2\sim 3\text{ d}$ 后再注), 以此进行 $2\sim 4$ 次。

对比常规注水, 在 #3 孔试验过程中, 从试验开始到 #1 孔内有水流出, 形成贯通, 13 min 内共注入水量约 2 m^3 , 短时间内的注水量远远大于常规注水, 且因为超高压水定点压裂使煤层产生大量裂缝, 可以很大程度提高煤体的注水量, 从而提高煤体的含水率。

随着大量水的注入, 煤体含水率增加, 通过水对煤体的物理化学作用, 软化煤体, 显著降低了煤体的冲击倾向性。与煤体注水前的脆性破坏相比, 注水后煤体的塑性显著增强, 塑性区吸收剩余能量的能力增强, 其积聚弹性能的能力下降, 为降低工作面的冲击危险起到了积极有效的作用。

3.4 微震监测效果检验

微震事件的能量和数量反映了煤岩体破裂程度和积聚弹性能的多少。#3 孔水力压裂试验前 30 min 内监测到微震事件 3 次, 总能量约为 5.66 kJ; 水力压裂开始到试验完成后的 30 min 内, 监测到微震事件 8 次, 总能量约为 16.41 kJ。水力压裂前后微震事件表明煤层在水力压裂试验开始后微震事件明显增多, 释放总能量明显增大, 说明煤体产生了较大程度的破裂。

3.5 设备和工艺的可行性

对比 3 个孔的压裂过程, 可以发现 #1 孔的起裂压力约为 29 MPa, #2 孔的起裂压力约为 23 MPa, #3 孔的起裂压力约为 24 MPa, 说明不同位置的煤岩体其力学性质不同, 导致起裂压力有一定差异。3 次试验过程中封孔器起压过程中无水流出, 保压正常, 可以达

到 30 MPa, 说明封孔效果较好。认为整个煤层超高压定点水力压裂试验选取的压裂设备和封孔工艺可行, 但是不同矿井的煤岩体性质存在差异, 在以后的推广应用中要根据自身矿井的煤岩体力学性质参数选取合适的压裂设备, 封孔采用本次试验的胶囊封孔器进行前后封孔, 保证起裂压力和封孔效果能达到要求。

4 结 论

(1) 试验证明煤层超高压定点水力压裂能够实现“转移应力、弱化煤体和降低蓄能”的防冲机理。

(2) 压裂压力达到 24 MPa 持续 11 s 之后煤体产生初次破裂, 持续 13 min 后压裂半径达到 8 m。

(3) 压裂过程中压裂点附近煤体应力动态为: 管路加压后距离压裂点 9.5 m 的煤层内应力值明显升高—煤体产生破裂并产生微震—管路压力骤降—测点应力趋于稳定。

(4) 超高压定点水力压裂后, 将煤体切割成了近似 $6.2\text{ m} \times 8.0\text{ m} \times 6.2\text{ m}$ 的长方体, 降低了煤体的整体强度, 减小了蓄能体单元体积, 从而减弱了煤体的蓄能能力; 超高压定点水力压裂提高了煤体的注水量, 从而提高了煤体的含水率, 有效降低了煤体的冲击倾向性。

定点超高压煤层压裂是实现“定量化”区域主动防冲的有效途径, 本文介绍的试验取得了初步效果, 还有很多技术细节需要进一步完善。

参考文献:

- [1] 姜瑞忠, 蒋廷学, 汪永利. 水力压裂技术的近期发展及展望[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(4): 52–56. (JIANG Rui-zhong, JIANG Ting-xue, WANG Yong-li. Present development and prospecting of hydraulic fracturing technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(4): 52–56. (in Chinese))
- [2] 唐颖, 唐玄, 王广源, 等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2): 393–399. (TANG Ying, TANG Xuan, WANG Guang-yuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 393–399. (in Chinese))
- [3] 王玉海, 王庆红, 闫桂芳, 等. 煤层气井压裂效果评价方法[J]. 油气井测试, 2010, 19(5): 44–47. (WANG Yu-hai, WANG Qing-hong, YUAN Gui-fang, et al. Evaluation method of fracturing effect for coal-bed gas wells[J]. Well Testing, 2010, 19(5): 44–47. (in Chinese))
- [4] 吴向前, 窦林名, 贺虎, 等. 济三煤矿深孔定向水力致裂防冲技术[J]. 中国煤炭, 2011, 37(10): 85–88. (WU

- Xiang-qian, DOU Lin-ming, HE Hu, et al. Technology of directional hydraulic fracture for rock - burst prevention in Jisan coal mine[J]. China Coal, 2011, 37(10): 85 - 88. (in Chinese))
- [5] 黄炳香, 程庆迎, 刘长友, 等. 煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 167 - 173. (HUANG Bing-xiang, CHENG Qing-ying, LIU Chang-you, et al. Hydraulic fracturing theory of coal-rock mass and its technical framework[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 167 - 173. (in Chinese))
- [6] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 1 - 17. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. The theory and technology of shock pressure in coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 1 - 17. (in Chinese))
- [7] 章梦涛, 宋维源, 潘一山. 煤层注水预防冲击地压的研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(10): 69 - 72. (ZHANG Meng-tao, SONG Wei-yuan, PAN Yi-shan. Study on water pouring into coal seam to prevent rock-burst[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(10): 69 - 72. (in Chinese))
- [8] 姜福兴, 魏全德, 姚顺利, 等. 冲击地压防治关键理论与技术分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 6 - 9. (JIANG Fu-xing, WEI Quan-de, YAO Shun-li, et al. Key theory and technical analysis on mine pressure bumping prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 6 - 9. (in Chinese))
- [9] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205 - 213. (JIANG Yao-dong, PAN Yi-shan, JIANG Fu-xing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205 - 213. (in Chinese))
- [10] 齐庆新, 雷毅, 李宏艳, 等. 深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 3522 - 3527. (QI Qing-xin, LEI Yi, LI Hong-yan, et al. Theory and application of prevention of rock burst by break-tip blast in deep hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3522 - 3527. (in Chinese))
- [11] 杨光宇, 姜福兴, 王存文. 大采深厚表土复杂空间结构孤岛工作面冲击地压防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 189 - 194. (YANG Guang-yu, JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen. Prevention and control technology of mine pressure bumping of coal mining face in seam island based on deep mining and thick topsoil of complex spatial structure of overlying strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 189 - 194. (in Chinese))
- [12] 王维虎. 煤层注水防尘技术的应用现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 57 - 60. (WANG Wei-hu. Application present status and outlook of seam water injection dust control technology[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 57 - 60. (in Chinese))
- [13] 张笑难, 蔡峰, 费玉祥, 等. 煤层注水除尘技术在综掘工作面中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(10): 85 - 88. (ZHANG Xiao-nan, CAI Feng, FEI Yu-xiang, et al. Research and application of affusion dust removal technology in the mechanized excavation face[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(10): 85 - 88. (in Chinese))
- [14] 黄炳香, 程庆迎, 陈树亮, 等. 突出煤层深孔水力致裂驱赶与浅孔抽采消突研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 701 - 711. (HUANG Bing-xiang, CHENG Qing-ying, CHEN Shu-liang, et al. Study of coal seam outburst mitigation by deep hole hydro-fracturing and shallow hole methane drainage[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5): 701 - 711. (in Chinese))
- [15] 石必明, 穆朝民. 突出煤层注水湿润防突试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 147 - 150. (SHI Bi-ming, MU Chao-min. Experiment study on water injection and moist role for outburst prevention of outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 147 - 150. (in Chinese))
- [16] 欧阳振华, 齐庆新, 张寅, 等. 水压致裂预防冲击地压的机理与试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊2): 321 - 325. (OUYANG Zhen-hua, QI Qing-xin, ZHANG Yin, et al. Mechanism and experiment of hydraulic fracturing in rock burst prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 321 - 325. (in Chinese))
- [17] 张新科. 高压水力压裂技术在冲击地压防治中的应用[J]. 煤矿安全, 2010, 41(8): 51 - 52. (ZHANG Xin-ke. The application of the high pressure hydraulic fracturing technology for prevention of rock burst[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(8): 51 - 52. (in Chinese))
- [18] 郭相斌. 煤层定向水力压裂防治冲击地压的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(6): 12 - 14. (GUO Xiang-bin. Experiment study on mine pressure bumping prevention and control with directional hydraulic fracturing in seam[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6): 12 - 14. (in Chinese))