

煤岩水力压裂裂缝扩展形态试验研究

姜婷婷^{1,2}, 张建华^{1,2}, 黄刚^{1,2}

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 通过室内水力压裂物理模拟试验系统, 对大尺寸原煤进行了水力压裂模拟试验, 根据水力裂缝的空间展布形态分析了煤岩储层水力裂缝的延伸规律, 揭示了网状裂缝的形成机制。结果表明: 水力裂缝易在弱层理处分叉和转向, 发育的层理和裂缝系统等结构面为压裂形成裂缝网络提供了前提条件。泵压曲线呈现出的频繁波动是煤岩内产生网状裂缝的一个显著特征。水力裂缝的起裂与延伸有4种基本模式, 裂缝网络的形成多为这4种基本模式的组合。地应力差异系数和泵注排量对煤层水力裂缝形态有较大影响。较小的地应力差异系数更利于网状裂缝的形成; 较高的压裂液排量易形成相对简单的裂缝形态, 导致压裂改造效果较差。该试验方法和试验结果可为现场水力压裂参数设计和优化提供参考和依据。

关键词: 真三轴试验; 水力压裂; 网状裂缝; 层理; 裂缝扩展

中图分类号: P 618.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 10-3677-08

Experimental study of fracture geometry during hydraulic fracturing in coal

JIANG Ting-ting^{1,2}, ZHANG Jian-hua^{1,2}, HUANG Gang^{1,2}

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Hubei Province Key Laboratory of Processing of Mineral Resources and Environment, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: In this study, hydraulic fracturing experiments were carried out on the large raw coal to investigate the influence of bedding planes on fracture propagation by using a true triaxial hydraulic fracturing experiment system. The extension rule of hydraulic fractures in coal was analysed to reveal the formation mechanism of net-cracking based on the spatial distribution. The results show that the hydraulic fracture tends to bifurcate and swerve at the weak bedding. Then the developed bedding and fracture system provide the premise conditions to establish a fracture network. From the pump pressure curve, its frequent fluctuation indicates a remarkable feature of the net-cracking in coal rock. There are four basic modes on the initiation and extension of hydraulic fractures, and the fracture network is the combination of the four modes. In-situ stress difference coefficient and injection displacement both have great influences on the hydraulic fracture geometry. The small in-situ stress difference coefficient is more likely to form the fracture network. However, a relatively simple fracture geometry is easily formed when the fracturing fluid displacement becomes high, which conversely results in a poor fracturing effect. The experimental methods and corresponding results can provide reference and basis for the design and optimisation of hydraulic fracturing parameters.

Keywords: true triaxial test; hydraulic fracturing; net-cracking; bedding; fracture propagation

1 引言

在实际工程中, 影响煤岩储层水力裂缝形态的因素很多, 例如地应力差异系数、基质与层理的力学性质、天然裂缝系统的分布与微裂缝发育程度等储层地质参数^[1-3], 以及压裂液黏度、泵注排量和施工时间等施工参数^[4-6]。因此, 煤层水力压裂裂缝预测与控制一直是一个研究的热点和难点问题, 国内

外很多学者开展了相应的试验与理论研究。孟尚志等^[7]通过室内大尺寸试验分析了分层试件的弹性模量差、地应力差和天然弱面对水力裂缝起裂及扩展规律、穿层条件的影响。Li 等^[8]研究了地层参数对水力裂缝起裂的影响, 认为当泵注压力保持不变时, 煤层孔隙度、渗透率、泊松比和弹性模量的增大可促使水力裂缝尽早开裂。Dehghan 等^[9]证实井筒周围的天然裂缝可以减少原始应力集中的影响, 从而

收稿日期: 2017-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51804236)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51804236).

第一作者简介: 姜婷婷, 女, 1985年生, 博士, 讲师, 主要从事非常规油气田开发方面的研究。E-mail: jiangtingting104@163.com

导致裂缝起裂和扩展压力的急剧降低。Teufel 等^[10]认为, 分层岩石的力学性能差异和边界面的剪切强度对穿层水力裂缝的形态起到控制作用。许露露等^[11]基于滤失经典理论, 建立了煤储层裂缝扩展模型, 认为滤失系数、压裂时间和排量是影响缝长的控制因素。范铁刚等^[12]对天然煤岩进行了室内试验, 研究了压裂液黏度和注液速率对水力裂缝形态的影响。董光等^[13]通过煤层裂缝导流能力试验, 研究了天然裂缝、闭合压力和铺砂浓度对裂缝导流能力的影响, 认为天然裂缝为最主要因素。

受限于储层力学参数分布规律的复杂性, 国内外学者对煤层水力裂缝扩展过程的研究大多数都是基于储层均质各向同性的基础上得到的。然而, 煤岩在成岩过程中形成的沉积层理对岩体的强度、破裂过程及稳定性均起控制作用, 因此, 在分析煤岩储层水力裂缝扩展过程时必须考虑层理的作用。同时, 受限于煤岩力学特性和煤炭开采方式, 大尺寸

煤岩试样获取成本较高, 室内试验多基于小尺寸煤岩试样, 不能较为准确地反映煤岩水力压裂裂缝扩展规律。因此, 笔者通过室内水力压裂物理模拟试验系统, 对大尺寸 (300 mm×300 mm×300 mm) 原煤试样进行了水力压裂模拟试验。根据水力压裂裂缝的空间展布形态分析了煤岩储层水力裂缝的延伸规律, 揭示了网状裂缝的形成机制。研究结果可为现场水力压裂参数设计和优化提供参考和依据。

2 大尺寸原煤水力压裂模拟试验

2.1 试验系统

根据室内水力压裂物理模拟试验分析的要求, 水力压裂模拟试验系统必须具备大尺寸真三轴加载和泵压伺服控制系统^[14-15]。同时在室内水力压裂模拟系统中引进了声发射空间实时监测定位系统, 以便对试验中裂缝扩展和压裂效果进行评价。图 1 为真三轴水力压裂试验系统结构图。

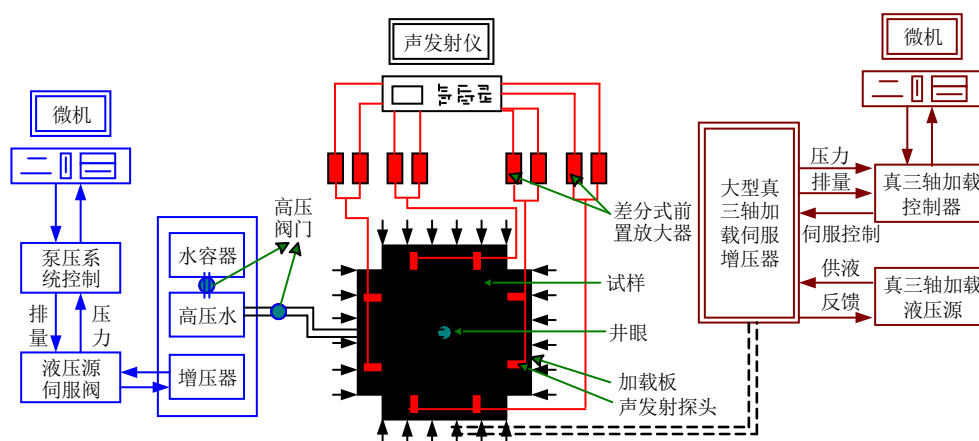


图 1 真三轴水力压裂试验系统结构图^[16]

Fig.1 Schematic of true triaxial hydraulic fracturing experiment system^[16]

2.1.1 岩土工程真三轴伺服加载系统

本文试验用到的三向加载电液伺服真三轴模拟试验系统如图 2 所示, 具备的主要特点包括^[17]: ①可以在 X、Y、Z 3 个方向独立加载, 能够真实地模拟实际地应力载荷分布; ②加载吨位大, 最大载荷均可达 3 000 kN; ③试样尺寸可达 800 mm×800 mm×800 mm; ④加载压力均匀性较好; ⑤加载受力控制性较好, 可有效避免偏心力和弯矩的产生。

2.1.2 泵压伺服控制系统

图 3 为压裂泵伺服控制系统, 其最大加载压力为 100 MPa, 控制精度为 1%; 位移传感器量程为 210 m, 测量精度为 1%; 增压器容积为 800 mL, 测量精度为 0.15 mL。该系统通过电脑编程控制,

可以模拟实际工况进行恒定排量或者波动排量泵注。试验中采集的数据包括泵压、排量等。本次压裂试验采用恒定排量, 其值分别为 30、60、90 mL/min。



图 2 真三轴物理模型试验机

Fig.2 True triaxial physical model testing machine



图 3 压裂泵伺服控制系统

Fig.3 Servo control system of fracturing pump

2.1.3 Disp 声发射监测系统

图 4 为 Disp 声发射监测系统, 其被广泛地应用于岩石材料监测等领域。室内水力压裂试验时采用 8 只工作频率为 15~70 kHz, 中心频率为 40 kHz 的 $\phi 22\text{ mm} \times 36.8\text{ mm}$ 声发射探头。为提高监测效果, 在模拟水平地应力的 4 个端面各非对称放置两个声发射探头, 并采用耦合剂将探头与试样黏结, 以便有效监测试样内的裂缝信息。



图 4 Disp 声发射检测系统

Fig.4 Disp acoustic emission detection system

为了满足水力压裂过程中进行声发射监测的要求, 对加载板进行了改造, 在加载板端面预制了 12 个 $\phi 25\text{ mm}$ 的声发射探头放置孔, 试验时可根据声发射三维定位效果来调整探头位置, 满足空间监测的效果。图 5 为试验机加载板。



图 5 试验机加载板

Fig.5 Loading board of the testing machine

2.2 试样的制备

水力压裂所用的试样采自河南省焦作矿区的山西组二₁煤层, 现场获取的煤岩加工成边长为 300 mm 的立方体试样。图 6 为大尺寸原煤试样及压裂井位置示意图。图中, 模拟套管采用高强度钢管, 其外径和内径分别为 20 mm 和 15 mm, 且在距离管口一端 135~165 mm 位置处对称切割 1.5 mm 宽的缝以模拟射孔, 钢管底端焊接封闭, 上端内置螺纹以便于与水力压裂泵伺服控制系统相连接, 并用高强度黏结剂将套管与预制井眼封固。高强度黏结剂采用环氧灌封胶, 使用时将 A 组分和 B 组分以 5:1 的配比混合, 为了避免固化不完全需要充分搅拌均匀, 常温条件下试样至少养护 24 h。图 7 为割缝套管, 在套管割缝处采用棉纱自管外向内充填, 充填部分长度为割缝长度 30 mm, 并保证管外剩余棉花长度为 2~5 mm。

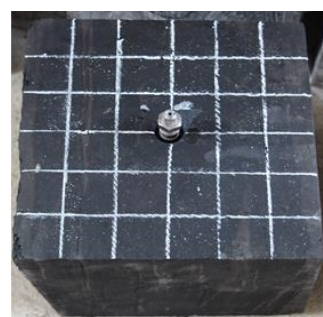


图 6 大尺寸原煤试样及压裂井位置

Fig.6 Large raw coal sample and the location of fracturing vertical well



图 7 割缝套管

Fig.7 Slotted casing

图 8 为水力压裂试验中压裂井、层理与三向地应力边界条件示意图。根据煤层实际情况, 煤层垂向地应力 σ_v 为 23.4 MPa, 其加载方向即为井眼方向, 最大水平地应力 σ_H 和最小水平地应力 σ_h 分别为 25.7 MPa 和 16.7 MPa, 两者方向均平行于层理。根据试验设备条件与相似理论公式, 取应力相似比为 5, 室内水力压裂试验时的三向加载应力分别为

$\sigma_v=4.68$ MPa、 $\sigma_H=5.14$ MPa、 $\sigma_h=3.34$ MPa。

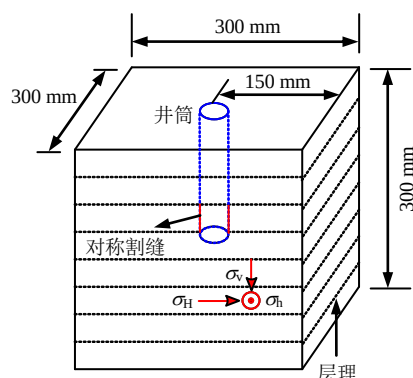


图8 压裂井、层理与三向地应力边界条件

Fig.8 Fracturing well, bedding and boundary conditions of three dimensional in-situ stress

2.3 试验方案

试验中采用航空液压油作为压裂液，它具有压缩性小和高压下性质稳定等优点，并在压裂液中添加红色示踪剂，方便试验人员观察试样中水力裂缝的延伸状态。试验时需要大型岩土工程真三轴伺服加载系统、水力压裂泵压伺服控制系统和声发射三维定位监测系统协同工作，其具体步骤为^[16]：

(1) 将标准立方体压裂试样放入真三轴加载室内。

(2) 在压裂试样平行井眼轴线的4个端面各非对称放置2个声发射探头，并用耦合剂将声发射探头与试样黏结。

(3) 试样装载完成后，用真三轴物理模型试验机完成三向地应力加载，三向应力加载完成后由伺服系统稳压，并保持三向伺服控制系统的压力稳定。启动水力压裂泵压伺服控制系统和声发射监测系统，以泵压排量为控制模式向试样内注入压裂液，电脑同步实时采集水力压裂过程中的泵注压力、活塞位移和相应声发射信息。

(4) 待试样形成稳定的裂缝通道后，首先关闭水力压裂泵压伺服控制系统，待泵压逐渐降低至稳定值后停止数据采集和声发射信息监测，并将真三轴物理模型试验机加载压力平稳卸载至0。

(5) 拆卸试样，对压裂后试样的6个端面用高清数码相机进行拍照记录，并用肉眼观察每个端面的红色示踪剂痕迹，初步识别水力裂缝信息和各端面的裂缝形态。

(6) 根据压裂后形成的水力裂缝通道对试样进行剖切，追踪红色示踪剂，进一步分析水力裂缝的延伸规律。综合分析水力压裂泵压-时间曲线、声发射监测信息及试样内红色示踪剂描述的裂缝延伸信

息，对水力裂缝的起裂和扩展规律及空间展布形态进行综合分析，初步探讨煤岩储层水力压裂网状裂缝的形成机制。

试验中用到的具体参数见表1。表中，地应力差异系数定义为

$$k = (\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_h \quad (1)$$

表1 煤岩水力压裂试验参数

Table 1 Parameters of coal rock hydraulic fracturing tests

试样编号	三向地应力/MPa			地应力差异系数	泵注排量/(mL/min)
	σ_v	σ_H	σ_h		
JZ-HF-1	4.68	5.14	3.34	0.54	30
JZ-HF-3	4.68	5.14	3.34	0.54	60
JZ-HF-2	4.68	5.14	3.34	0.54	90
JZ-HF-10	4.68	5.14	3.67	0.40	30
JZ-HF-4	4.68	5.14	3.02	0.70	30

2.4 试验结果及分析

水力压裂后，试样 JZ-HF-4 沿最大水平主应力方向开裂，形成单一裂缝；试样 JZ-HF-2 沿层理开裂，形成相对简单的裂缝；而其余试样都形成了网状裂缝。分析后认为，煤岩层理、微裂缝发育程度、地应力大小和压裂液排量均是形成网状裂缝的关键因素。如图 9(a)所示，当地应力差异系数为 0.7 时，水力裂缝沿最大地应力方向起裂并延伸，形成垂直层理的单一裂缝。压裂液排量 90 mL/min 时，尽管垂向地应力较大，水力裂缝仍沿层理起裂并延伸(见图 9(b))。如图 9(c)所示，在水力压力作用下，水力裂缝沿水平最大地应力方向起裂并延伸，形成垂直层理的主裂缝，在主裂缝延伸过程中会在弱层理处转向并沿层理继续扩展，主裂缝会发生分叉、转向现象，产生沿层理延伸的次生裂缝，最终形成正交的复杂裂缝网络。

鉴于本文集中在通过一套完整的水力压裂裂缝表征方法对裂缝的空间展布形态及扩展规律进行研究^[16]，下面对试样 JZ-HF-3 的压裂试验结果进行详细分析以说明水力压裂裂缝扩展规律及其形成机制。

2.4.1 泵压曲线分析

图 10 为以恒定排量泵注方式下的泵压-时间曲线。由图可知：在泵注的初期，泵压近似呈线性迅速上升并达到最大值，此时试样内开始产生水力裂缝，随后压裂液进入裂缝内，泵压迅速降低。泵压呈现出频繁的锯齿状波动，说明水力裂缝在扩展过程中产生了更多的次生裂缝，并使压裂液产生较多的滤失。泵压频繁的波动也是煤岩在水力压裂过程中形成网状裂缝的显著特征之一。当泵压降低至某

一特定的值，泵压进入稳定状态，此时水力渗流通道已经完全形成。



(a) 沿最大水平主应力的单一裂缝 (b) 沿层理的平行裂缝



(c) 正交复杂裂缝

图 9 煤岩水力压裂裂缝形态

Fig.9 Fracture morphology of coal rock hydraulic fracturing test

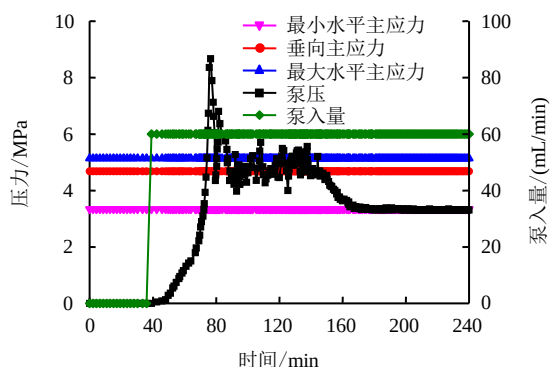


图 10 水力压裂泵压曲线

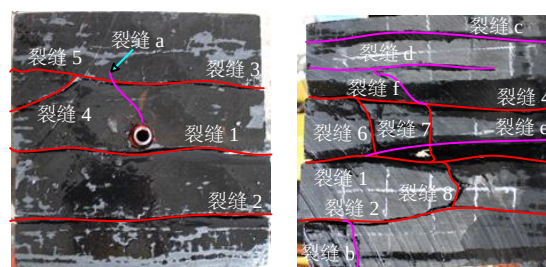
Fig.10 Pressure histories of hydraulic fracturing injection

2.4.2 压裂后裂缝剖切

图 11 为压裂后垂直层理方向与平行层理方向上的裂缝实际形态。由于压裂后试样在搬抬过程中难免有一定的损伤，因此，在裂缝实际形态图中仅给出关键部位的裂缝形态和延伸特征。图 11(a)中形成了 3 条贯穿层理和两个结构面的长裂缝，且在长裂缝的局部形成了分支裂缝。图 11(b)中，试样表面有多条沿层理方向扩展的水力裂缝，正是这些压裂缝沟通了弱层理或天然裂缝，使水力裂缝发生分叉、转向等现象，并最终形成相互交错的裂缝网络。

图 12 为试样 JZ-HF-3 剖切后的局部裂缝形态。由图可知，煤岩储层水力裂缝垂直层理沿水平最大主应力方向起裂，并近似沿水平最大主应力方向扩展，裂缝扩展至天然裂缝处发生转向、分叉现象。

同时，水力裂缝在延伸过程中在弱层理面起裂，沟通了层理，形成了纵横交错的裂缝网络，达到了改造煤层气藏的目的。



(a) 垂直层理方向 (b) 平行层理方向

图 11 压裂后裂缝形态

Fig.11 Fracture morphology after fracturing



(a) 垂直层理方向 (b) 平行层理方向

图 12 试样 JZ-HF-3 剖切后的裂缝

Fig.12 Cracks after cutting of JZ-HF-3

综上所述，煤岩储层天然裂缝、层理较发育，存在大量裂隙，非均质性较强，压裂改造后形成的裂缝形态较复杂，不同于常规砂岩储层的 180°双翼对称平面裂缝。煤岩储层内水力裂缝与天然裂缝及层理相互作用后产生的分叉、转向等延伸形态是影响裂缝沟通效果及复杂程度的关键。

2.4.3 声发射监测研究

图 13 分别给出了大型水力压裂试验声发射传感器的三维空间分布图。水力压裂过程中共使用了 8 个声发射传感器，并将它们平均分成 4 组，分别置于上、下、左、右 4 个平面上，同一平面内的两个探头呈对角线形式分布。

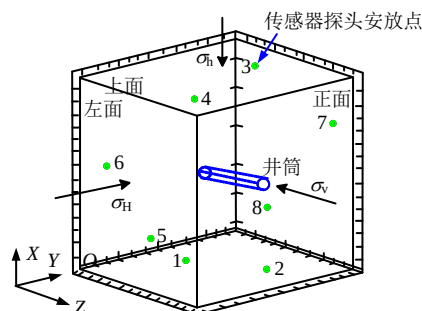


图 13 声发射传感器分布图

Fig.13 Distribution of acoustic emission sensors

由图 13 可知, 点 O 为三维坐标系的原点, X 、 Y 、 Z 轴分别沿着水平最小主应力、水平最大主应力和垂向主应力的方向, 正方体原煤试样的边长均为 300 mm, 声发射传感器的三维坐标如表 2 所示。

表 2 声发射传感器三维坐标
Table 2 Three-dimensional coordinates of acoustic emission sensors

传感器编号	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	0	110	90
2	0	190	210
3	300	190	90
4	300	110	210
5	110	0	210
6	190	0	90
7	190	300	210
8	110	300	90

图 14 为大型水力压裂试验结束后试样内检测到的声发射事件定位分布与水力裂缝扩展形态图。图中绿色的点为声发射探头的放置点, 红色的点表示声发射信号, 说明在该位置发生了裂缝起裂与扩展。

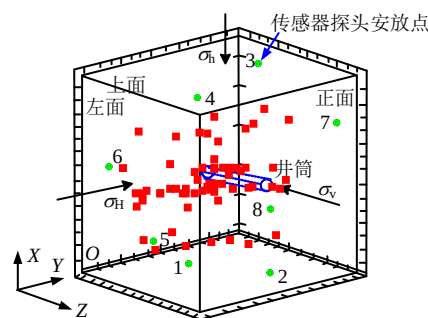
图 14(a)为声发射事件的三维定位图。图 14(b)给出了垂直层理方向上的声发射事件定位和水力裂缝扩展分布图。由图 14(b)可知, 水力裂缝在井壁附近近似沿最大水平主应力方向起裂后, 仍有可能继续沿着最大水平主应力方向扩展, 同时裂缝在延伸过程中在天然裂缝、裂隙处会发生转向、分叉现象。由图 14(c)可知, 平行层理方向时, 裂缝仍在井壁附近起裂, 多条裂缝扩展方向垂直层理。受层理影响, 裂缝在扩展过程中不断发生断裂路径偏移, 裂缝在弱层理处会发生转向、分叉现象, 转向后的裂缝沿层理继续扩展, 最终形成纵横交错的裂缝网络。图 14(b)和图 14(c)分别对应裂缝实际扩展形态图 11(a)与图 11(b), 经对比可知, 声发射三维空间定位监测到的裂缝形态与试样的压裂裂缝形态大体相同, 说明采用声发射监测水力裂缝的扩展具有较高精度。

2.4.4 层理对水力裂缝扩展的影响

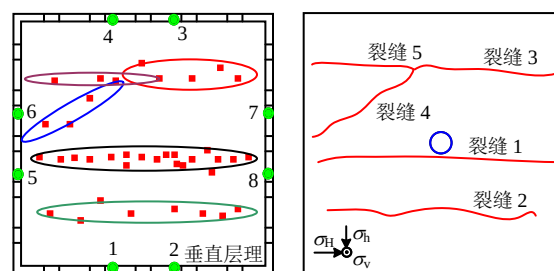
水力裂缝沟通层理时主要形成 T 字型和十字型的复杂裂缝形态, 即水力裂缝在煤岩储层中延伸时, 主要是垂直层理和沿层理方向的扩展, 但水力裂缝在层理处的扩展行为与层理的胶结强度密切相关。层理的强度较小, 阻止裂缝扩展的能力较弱, 而在垂直层理方向, 阻止裂缝扩展的能力较强^[18]。

因此, 煤岩储层水力压裂过程中, 当水力裂缝垂直层理扩展时, 容易在弱层理处发生分叉、转向

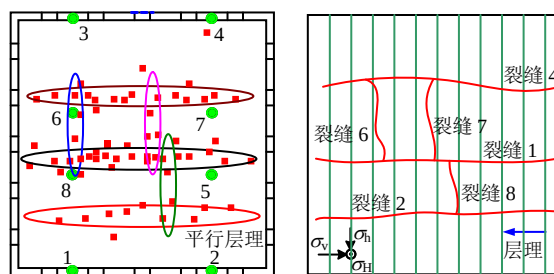
等现象, 且在继续延伸的过程中会进一步沟通天然裂缝或层理而形成复杂的裂缝网络, 达到体积压裂的效果。这进一步说明煤岩储层内足够的结构面(天然裂缝、节理或层理)是实现体积压裂的前提。结构面的抗拉强度、断裂韧性都远小于基质体的抗拉强度与断裂韧性, 水力裂缝在扩展的过程中会优先开启弱的结构面而发生分叉、转向, 进而引起压裂液的大量滤失并需泵入更多压裂液, 从而促使水力裂缝沟通更远区域的天然裂缝或层理, 直至形成网状裂缝通道, 达到体积压裂效果。



(a) 声发射事件定位三维分布图



(b) 垂直层理方向



(c) 平行层理方向

图 14 声发射事件定位与水力裂缝扩展形态
Fig.14 Acoustic emission event location and hydraulic fracture extension form

3 煤岩网状裂缝的形成机制研究

根据以上真三轴试验对煤岩水力裂缝形态及扩展规律的分析可知, 网状裂缝的形成不仅与地应力大小、泵注排量等参数相关, 还与天然裂缝和层理的发育程度等基本地质条件密切相关, 且后者是形成复杂裂缝网络的关键因素。

然而,在实际中不同层理的力学性质差异较大,不同层理对水力压裂裂缝的形成及扩展有着不同程度的影响。图 15 为综合分析后得到的煤岩水力裂缝起裂与扩展的 4 种基本模式^[16]。

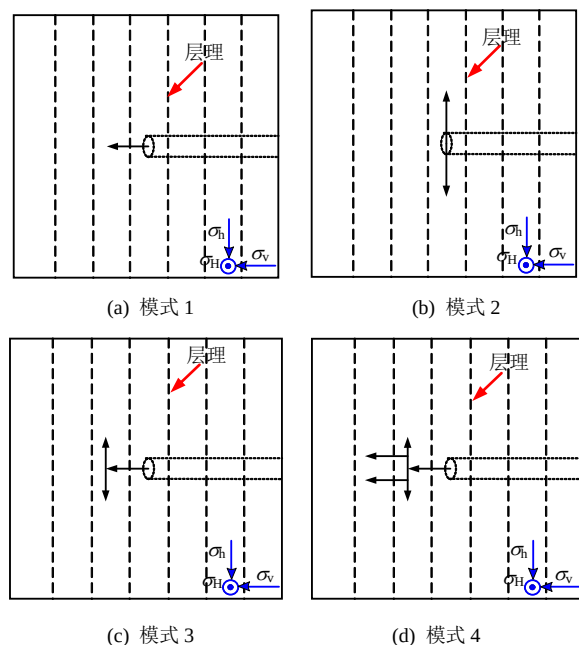


图 15 煤岩水力裂缝起裂与扩展的 4 种模式

Fig.15 Four initiation and extension patterns of coal rock hydraulic fracture

模式 1 (见图 15(a)) 往往发生在煤岩层理的胶结性较强,且微裂缝不发育时。此时,水力裂缝垂直煤岩层理沿水平最大主应力方向起裂并延伸,在扩展过程中,直接穿过层理,形成单一裂缝。

模式 2 (见图 15(b)) 通常发生在煤岩层理的胶结强度较低或微裂缝发育较好时。水力裂缝沿层理起裂并扩展,形成沿层理的简单裂缝。

模式 3 (见图 15(c)) 中,水力裂缝最初沿水平最大地应力方向起裂,在继续延伸过程中,遇到弱层理后发生转向,转为沿层理扩展,最终形成交叉裂缝。

模式 4 (见图 15(d)) 多发生在层理强度适中且缝内压力相对较高时。水力裂缝沿水平最大地应力方向起裂并扩展,在延伸过程中,遇到弱层理后发生转向,改为沿层理扩展。在沿层理延伸的过程中,受地应力作用,局部裂缝再次转向,重新沿水平最大地应力方向扩展,直至形成复杂的裂缝网络。

综上所述,煤岩层理过弱或过强都不利于裂缝网络的形成,同时地应力的相对大小和方向对裂缝网络的形成有一定的控制作用。在实际受力情况下,煤岩水力裂缝的延伸多为上述 4 种基本模式的

复合。

4 结 论

(1) 煤岩层理等弱面对水力裂缝形态有较大影响。煤岩水力压裂过程中,当水力裂缝垂直层理扩展时,易在弱层理处发生分叉和转向现象,发育的层理和裂缝系统等结构面不仅为煤层气的储集和运移提供了必要条件,还为压裂形成裂缝网络提供了前提条件。

(2) 泵压曲线呈现锯齿状频繁的波动,是煤岩内产生网状裂缝的一个显著特征。

(3) 煤岩储层水力裂缝的起裂与延伸主要有 4 种基本模式,而实际水力压裂裂缝网络的形成多为 4 种基本模式组合而成。层理过弱或过强都不利于裂缝网络的形成。

(4) 地应力差异系数和泵注排量对煤层水力压裂微裂缝的形态有较大影响。较大的地应力差异系数不利于煤层内网状裂缝的形成。在较高压裂液排量下,压裂改造效果较差,易形成相对简单的裂缝形态。在实际施工过程中,要实时控制压裂液排量,避免因排量过大造成压裂效果较差。

参 考 文 献

- [1] JIANG Ting-ting, ZHANG Jian-hua, WU Hao. Effects of fractures on the well production in a coalbed methane reservoir[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(22): 494.1—494.10.
- [2] JIANG Ting-ting, ZHANG Jian-hua, WU Hao. Impact analysis of multiple parameters on fracture formation during volume fracturing in coalbed methane reservoirs[J]. *Current Science*, 2017, 112(2): 332—347.
- [3] WANG Tong-tao, YANG Chun-he, YAN Xiang-zhen, et al. Dynamic response of underground gas storage salt cavern under seismic loads[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43(7): 241—252.
- [4] JIANG Ting-ting, ZHANG Jian-hua, HUANG Gang, et al. Experimental study on the mechanical property of coal and its application[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2018, 14(1): 9—17.
- [5] JIANG Ting-ting, ZHANG Jian-hua, HUANG Gang, et al. Effects of bedding on hydraulic fracturing in coalbed methane reservoirs[J]. *Current Science*, 2017, 113(6): 1153—1159.
- [6] WANG Tong-tao, YANG Chun-he, SHI Xi-lin, et al. Failure analysis of thick interlayer from leaching of

- bedded salt caverns[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 73: 175—183.
- [7] 孟尚志, 侯冰, 张健, 等. 煤系“三气”共采产层组压裂裂缝扩展物模试验研究[J]. **煤炭学报**, 2016, 41(1): 221—227.
- MENG Shang-zhi, HOU Bing, ZHANG Jian, et al. Experimental research on hydraulic fracture propagation through mixed layers of shale, tight and coal seam[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(1): 221—227.
- [8] LI Quan-shu, XING Hui-lin. Numerical analysis of the material parameter effects on the initiation of hydraulic fracture in a near wellbore region[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2015, 27: 1597—1608.
- [9] DEHGHAN A N, GOSHTASBI K, AHANGARI K, et al. Mechanism of fracture initiation and propagation using a tri-axial hydraulic fracturing test system in naturally fractured reservoirs[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2016, 20(5): 560—585.
- [10] TEUFEL L W, CLARK J A. Hydraulic fracture propagation in layered rock: Experimental studies of fracture containment[J]. **Society of Petroleum Engineering Journal**, 1984, 24(1): 19—32.
- [11] 许露露, 崔金榜, 黄赛鹏, 等. 煤层气储层水力压裂裂缝扩展模型分析及应用[J]. **煤炭学报**, 2014, 39(10): 2068—2074.
- XU Lu-lu, CUI Jin-bang, HUANG Sai-peng, et al. Analysis and application of fracture propagation model by hydraulic fracturing in coal-bed methane reservoir[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(10): 2068—2074.
- [12] 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.
- FAN Tie-gang, ZHANG Guang-qing. Influence of injection rate and fracturing fluid viscosity on hydraulic fracture geometry in coal[J]. **Journal of China University of Petroleum**, 2014, 38(4): 117—123.
- [13] 董光, 邓金根, 朱海燕, 等. 煤层水力压裂裂缝导流能力实验评价[J]. **科学技术与工程**, 2013, 13(8): 2049—2052.
- DONG Guang, DENG Jin-gen, ZHU Hai-yan, et al. Experimental evaluation on conductivity of hydraulic fracture in CBM wells[J]. **Science Technology and Engineering**, 2013, 13(8): 2049—2052.
- [14] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 页岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2014, 36(7): 1243—1251.
- HENG Shuai, YANG Chun-he, ZENG Yi-jin, et al. Experimental study on hydraulic fracture geometry of shale[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(7): 1243—1251.
- [15] JIANG Ting-ting, ZHANG Jian-hua, WU Hao. Experimental and numerical study on hydraulic fracture propagation in coalbed methane reservoir[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2016, 35: 455—467.
- [16] 姜婷婷. 煤层气藏水力压裂网状裂缝形成机理及扩展研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015.
- JIANG Ting-ting. Study on the mechanism of hydraulic fracture network and propagation in coalbed methane reservoir[D]. Dongying: China University of Petroleum (EastChina), 2015.
- [17] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(1): 52—59.
- GUO Yin-tong, YANG Chun-he, JIA Chang-gui, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(1): 52—59.
- [18] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 34(2): 228—237.
- HENG Shuai, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(2): 228—237.