

DOI: 10.11779/CJGE201407008

# 页岩水力压裂裂缝形态的试验研究

衡 帅<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1, 2</sup>, 曾义金<sup>3</sup>, 郭印同<sup>1</sup>, 王 磊<sup>1</sup>, 侯振坤<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400041; 3. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘 要:** 为深入认识页岩储层水力裂缝延伸规律及其空间形态, 采用真三轴岩土工程模型试验机、压裂泵压伺服控制系统、Disp 声发射定位系统和工业 CT 扫描技术, 建立了一套室内页岩水力压裂大型物理模拟试验方法, 并通过试验页岩试样水力裂缝的延伸与空间展布规律, 初步探讨了页岩水力压裂网状裂缝的形成机理。结果表明: 裂缝延伸时泵压曲线典型的锯齿状波动与裂缝网络的形成密切相关, 是页岩体积压裂的一个明显特征。页岩层理面的发育程度、泵压大小和地应力状态对裂缝形态有显著影响, 水力裂缝在层理面内的分叉、转向进而沟通天然裂缝是形成裂缝网络的关键, 而层理面过弱或过强都不利于网状裂缝的形成; 对层理面胶结强度适中的地层, 地应力对裂缝的延伸有较大影响; 在低排量且维持较低泵压时, 裂缝易于转向, 且更易形成网状裂缝, 而达到体积压裂。建立的页岩水力压裂物理模拟试验方法及试验结果可为页岩气压裂优化设计等提供技术支持。

**关键词:** 页岩; 水力压裂; 裂缝形态; CT 扫描; 网状裂缝; 裂缝延伸

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2014)07-1243-09

**作者简介:** 衡 帅(1985-), 男, 河南新安人, 博士研究生, 主要从事页岩气水力压裂开采过程中的岩石力学问题研究。E-mail: shheng@yeah.net。

## Experimental study on hydraulic fracture geometry of shale

HENG Shuai<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>1, 2</sup>, ZENG Yi-jin<sup>3</sup>, GUO Yin-tong<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, HOU Zhen-kun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400041, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

**Abstract:** For thorough understanding of the propagation and spatial form of hydraulic fracture of shale formations, a large-scale physical simulation test method for hydraulic fracture of shale is established by means of the large real triaxial simulation experiment system, servo control system of hydraulic fracturing, acoustic emission (AE) source orientation technique and CT scanning technology. The mechanism of the formation of the fracture network is exposed according to the crack extension and special distribution of shale tested by this method. The results indicate that the typical jagged pump pressure-time curve at extending stage, which may be closely related to the formation of fracture network, is an obvious feature of the volume fracture of shale. The fracture morphology is strongly influenced by the development degree of bedding planes, pump pressures and stress conditions. Branching and re-orientation of hydraulic fractures in bedding planes and then interconnecting with natural fractures are the main factors of the formation of fracture network. The bedding plane which is too weak or too strong is not conducive to the formation of fracture mesh. The stress condition plays a great role in controlling the extension of fractures for intermediate formations. Hydraulic fractures are easy to change direction and propagate when the pump pressure is kept at a lower level. The physical simulation method for hydraulic fracture and the corresponding test results can provide references for fracture optimization design in exploiting shale gas.

**Key words:** shale; hydraulic fracture; fracture morphology; CT scanning; fracture network; crack propagation

## 0 引 言

页岩气是指以吸附或游离状态存在于泥岩、高碳泥岩、页岩及粉砂质岩层中的天然气, 其分布广泛, 开采潜力巨大, 是常规能源的理想替代品<sup>[1-2]</sup>。但由于

其储层的低孔和低基质渗透率, 在页岩气钻完井后,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104144); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB226701); 中石化科技部项目(P11015)  
收稿日期: 2013-12-16

只有少数天然裂缝异常发育的井可直接投入生产,而大多数都要经过酸化、压裂等储层改造后才能获得比较理想的产量<sup>[3-4]</sup>。北美地区页岩气开发已逐渐形成了一套以“体积改造”为目的的压裂技术,并实现了大规模商业开发。而中国页岩气资源虽然储量丰富,勘探开发潜力巨大,但尚处于起步阶段,许多关键问题亟待解决。因此,借鉴北美页岩气成功开采经验,并根据我国页岩气藏储层特点,加快技术研发,尽快形成适应中国储层特征的压裂技术措施,对加快中国页岩气勘探开发步伐具有重要的现实意义。

页岩气开采的核心技术之一是对储层进行压裂改造,产生裂缝网络。然而,中国页岩气储层的埋藏通常较深(多为 1500~4000 m,部分超过 5000 m<sup>[5-6]</sup>),且地下储层结构和应力水平异常复杂,更缺乏准确、有效的现场监测手段,因而无法直接观测地下储层的水力压裂效果。因此,作为页岩气开采中迫切需要解决的关键科学问题之一,探明和掌握页岩水力压裂裂缝的起裂条件、延伸规律和影响因素,对水力压裂设计、储层改造和提高采收率等至关重要。而针对页岩储层特征进行的室内水力压裂物理模拟试验,可确定页岩的可压裂性、破裂压力和造缝效果等,是认识页岩裂缝几何形态和扩展规律的一种可靠、有效手段。

目前,国内外学者都已认识到岩石水力压裂复杂裂缝延伸形态的存在。Warpinski 等<sup>[7-9]</sup>通过矿场试验首次发现了压裂时主裂缝与复杂分支裂缝的同时延伸现象,并提出了裂缝延伸带的概念;Mahrer 等<sup>[10]</sup>认为天然裂缝性地层压裂后将形成复杂的裂缝网络;Beugelsdijk 等<sup>[11]</sup>通过室内试验证实了压裂时裂缝网络的存在;Blanton 等<sup>[12-13]</sup>通过物理模拟试验,分析了水力裂缝遇到天然裂缝后可能存在的 3 种状态,即穿过、转向和穿过与转向同时发生;Fisher 等<sup>[14-17]</sup>通过微地震监测了页岩储层水力压裂时形成的网状裂缝;Mayerhofer 等<sup>[18-19]</sup>认为提高油藏改造体积,形成最大化的缝网展布,才是页岩储层改造成功的关键。陈勉等<sup>[20]</sup>用大尺寸真三轴水力压裂模拟试验系统,对天然和人造试样进行了水力压裂试验,分析了地应力、断裂韧性、节理和天然裂缝等对压裂缝扩展的影响;周健等<sup>[21]</sup>用大尺寸真三轴水力压裂试验系统进行了含天然裂缝人造试样的水力压裂试验,分析了裂缝性储层水力裂缝走向的干扰因素;姚飞等<sup>[22]</sup>分析了裂缝性地层中天然裂缝对水力裂缝延伸的影响,并指出其水力裂缝的延伸具有一定的随机性。由此可知,虽然国内外对复杂裂缝的延伸规律进行了一系列的研究,但该研究成果多是针对人工相似配比材料或均质性较好的砂岩等,且水力裂缝的描述主要靠直接观察,而较

少对压裂过程裂缝信息进行实时监测。因此,需要开展适用于页岩储层特征的水力压裂物理模拟试验,并深入认识其水力裂缝的延伸规律和空间展布形态。

本文通过室内大型真三轴水力压裂模拟试验系统,以天然露头页岩为物理模拟对象,采用多套裂缝监测手段相配合的方法,系统地开展了页岩水力压裂物理模拟试验,并分析了裂缝形态和延伸规律,为页岩气藏水力压裂开采等提供了技术支持。

## 1 室内大型水力压裂试验系统简介

室内大型水力压裂试验系统主要由岩土工程真三轴伺服加载系统、伺服泵压控制系统和 Disp 声发射空间定位监测系统等,图 1 为该试验系统进行水力压裂物理模拟时的技术路线。

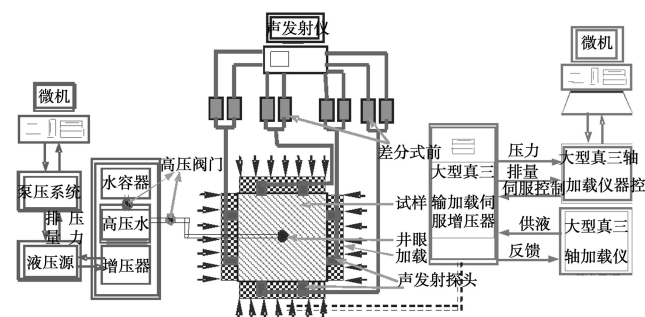


图 1 室内真三轴水力压裂试验路线图

Fig. 1 Technical route of real triaxial fracturing simulation experiment system

### 1.1 大型岩土工程真三轴伺服加载系统

如图 2 所示,大型岩土工程模型试验机是三向加载电液伺服真三轴模拟试验机,较适合模拟地层的三向应力状态,且与同类设备相比,具有如下优越性:

(1) 真三轴模型试验功能。该试验机  $X$  (左右向)、 $Y$  (垂直向)、 $Z$  (前后向) 3 个方向均由轴向加载系统独立加压,能更真实地模拟地下岩层的三向受力状态。

(2) 模型尺寸大。试验机最大加载试样尺寸可达  $800\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ ,且可根据模拟的实际情况,选择合适的试样尺寸。

(3) 加载吨位大。试验机  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  3 个方向所加最大载荷均可达 3000 kN,即可以模拟地下工程的真实高应力状态。

(4) 加载受力均匀性较好。加载过程中,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  3 个方向通过连接板、传力板及定向装置等,把轴向加载的力均匀地传到试样各个面上,较好地解决了以往模型试验中采用千斤顶直接加载时受力均匀性较差的问题,且采用柔性囊加载时行程偏小、强度偏低

的技术难题。



图 2 大型真三轴物理模型试验机

Fig. 2 Large real triaxial physical model experiment

为了在水力压裂过程中进行声发射监测,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,从而达到较好的声发射监测效果,图 3 为改造后的试验机加载板和组装效果示意图。

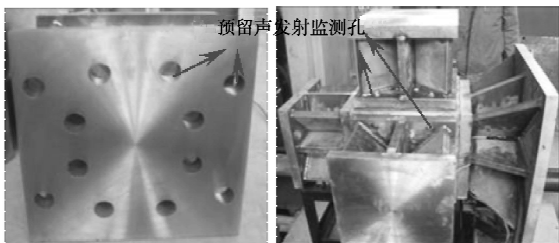


图 3 试验机加载板和组装示意图

Fig. 3 Loading plate of tester and packaging of loading plate

1.2 水力压裂泵压伺服控制系统

图 4 为水力压裂泵压伺服控制系统,其技术参数为:最高输出压力 100 MPa,分辨率为 0.05 MPa,测量精度 1%;增压器有效容积 800 mL,配备 210 mm 位移传感器,且分辨率为 0.04 mm(体积分辨率为 0.15 mL),精度 1%;采用高灵敏度电液伺服阀,且进回油口均配备蓄能器,以提高系统的动态响应,并保证伺服阀工作的稳定性。

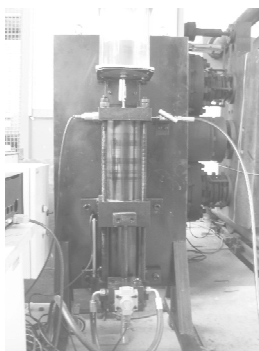


图 4 压裂泵伺服控制系统

Fig. 4 Servo control system of hydraulic fracture pump

1.3 声发射三维定位监测系统

Disp 声发射监测系统由美国物理声学公司研制,

并广泛应用于岩石声发射监测、金属材料、航空航天材料、压力容器、桥梁和管道检测等领域。在室内水力压裂试验中采用了声发射的三维定位功能来监测水力裂缝的起裂、扩展及裂缝集中区域。

试验中采用 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,并添置相应放大器。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 2 只声发射探头,如图 5 所示,且采用耦合剂将探头与试样黏结,以便有效监测试样内部的裂缝信息。

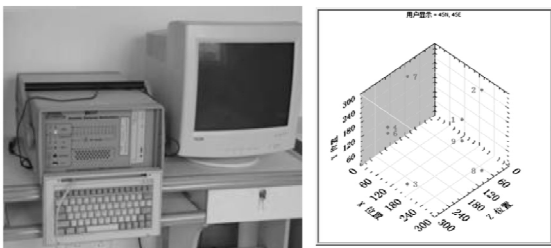


图 5 Disp 声发射监测系统和其定位图

Fig. 5 Disp acoustic emission equipment and its location

2 室内水力压裂物理模拟试验

2.1 试样来源

试验所用岩样均取自重庆彭水页岩气区块储层自然延伸的石柱县漆辽海相志留统龙马溪组页岩露头。图 6 为取样现场。该地层为黑色—深黑色碳质页岩,薄层—中厚层平行交互,层理面发育,层间黏结力小且易风化开裂;层理面浪成波浪痕发育,可见丰富的笔石、放射虫等化石;且含星散状黄铁矿、黄铁矿结核及石英、方解石充填裂隙矿脉。

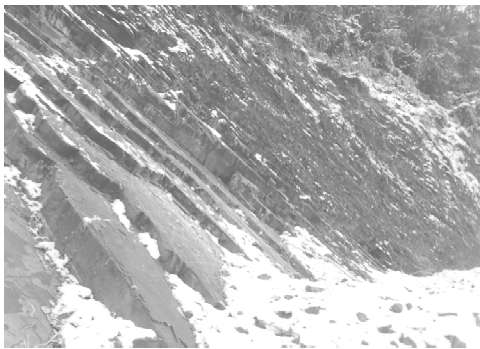


图 6 页岩取样现场

Fig. 6 Site sampling

室内试验测得该页岩基本物理力学参数为:垂直层理面抗压强度为 118 MPa,弹性模量为 14.06 GPa,泊松比为 0.367,抗拉强度为 9.67 MPa;平行层理面抗压强度为 118.4 MPa,弹性模量为 25 GPa,泊松比 0.312,抗拉强度为 4.86 MPa;其石英含量为 53.41%,

而黏土矿物相对较少,脆性较强,其余组分主要为钠长石、钾长石、方解石和黄铁矿。

2.2 试样制备

现场获取的露头页岩经过水力切割后加工为 300 mm×300 mm×300 mm 的水力压裂试样,并用外径 24 mm 的金刚石钻头垂直层理面和平行层理面钻取深 170 mm 的孔来预制井眼,从而模拟竖直井和水平井。模拟套管采用外径 20 mm,内径 15 mm 的高强度钢管,且在深 135~165 mm 处对称切割 1.5 mm 宽的缝作为水力通道,如图 7 所示。对钢管底端焊接封闭,上端内置螺纹以便与水力压裂泵压伺服控制系统的泵管线密封连接,且用高强度粘结剂将套管与预制井眼封固,为防止粘结剂封堵割缝通道,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 10~15 mm。模拟竖直井时,如图 8 所示,设定套管割缝方位与水平最大地应力夹角依次为 0°,30°,45°,60°和 90°;而模拟水平井时,套管割缝方位与层理面垂直。本文暂仅考虑竖直井的水力裂缝延伸规律及空间形态。

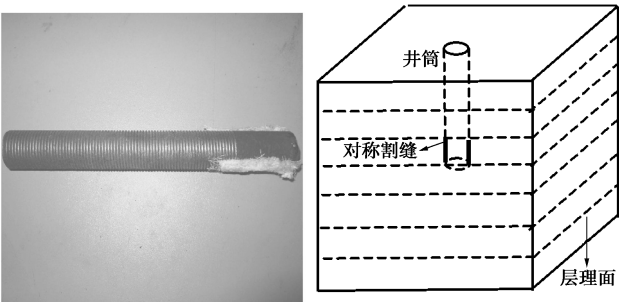


图 7 对称割缝钢管及其在试样内的位置

Fig. 7 Symmetrical slotted pipe and its location in specimen

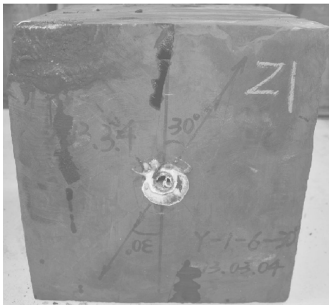


图 8 套管割缝呈 30° 夹角

Fig. 8 Cutting pipe with an angle of 30°

2.3 试验方法

采用真三轴大型岩土工程模型试验机模拟地层的三向应力状态,水力压裂泵压伺服系统控制压裂液的排量,用 8 通道 Disp 声发射定位系统监测定位水力裂缝的起裂和延伸信息,而试样在压裂前后分别用空间分辨率 2.5 LP/mm,最大成像像素为 4096×4096,尺

寸测量精度为 0.02~0.05 mm 的工业 CT 设备进行断面裂缝信息扫描,以了解其天然裂缝和压裂后裂缝的空间形态。试验中用清水作为压裂液,并在压裂液中添加红色示踪剂,通过红色示踪剂的波及范围来表征水力裂缝的延伸形态。

图 1 为水力压裂试验方法的技术路线图。在试验过程中,三向地应力加载完毕时,同时启动泵压伺服控制系统和声发射监测系统,且计算机同步实时采集泵压数据和声发射监测信息。试验后,首先对试样各表面的裂缝形态进行描述;接着进行工业 CT 断面扫描,最后根据水力通道对试样进行剖切,通过追踪红色示踪剂来描述水力压裂裂缝的形态。

3 页岩水力压裂裂缝形态分析

在水力压裂前,通过工业 CT 扫描确定试样内部天然裂缝的发育状况后,对比压裂后 CT 扫描的裂缝形态和剖切后红色示踪剂的流动通道,全面认识页岩储层水力压裂的裂缝形态。然而,鉴于工业 CT 扫描的昂贵费用,仅能对部分试样进行压裂前后断面的 CT 扫描。而对大多数试样,仅能通过声发射监测和压裂后追踪红色示踪剂的痕迹来表征水力裂缝的延伸规律与空间形态,即建立采用声发射定位和红色示踪剂追踪等方法来综合表征水力裂缝的起裂和延伸形态的方法。部分试样的压裂参数如表 1 所示。

表 1 水力压裂试验参数

Table 1 Test parameters for hydraulic fracture									
试样 编号	三向地应力/MPa			地应力 差异 系数	割缝 角度 /(°)	泵压 排量 /(mL·s <sup>-1</sup> )			
	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$						
Y-2	20	19.51	18.58	0.05	30	0.5			
Y-4	20	19.51	17.74	0.10	30	0.5			
Y-14	20	19.51	16.98	0.15	30	0.5			
Y-16	20	19.51	17.74	0.10	0	0.5			
Y-5	20	19.51	17.74	0.10	30	1.0			
Y-7	20	19.51	17.74	0.10	30	1.5			

注:地应力差异系数  $k=(\sigma_H-\sigma_h)/\sigma_h$ , 其中  $\sigma_H$  为水平最大地应力,  $\sigma_h$  为水平最小地应力。室内试验时,考虑到真三轴加载过程中加载板可能对试样造成较严重的内部损伤,甚至会发生破坏开裂现象,试验加载时,对实际模拟的地应力状态进行了同等比例的降低。

水力压裂后,仅 Y-2 试样直接沿天然层理面开裂,未形成网状裂缝;而其余 5 块试样虽然都形成了网络裂缝,但其裂缝形态却差异较大。分析后认为:页岩层理和微裂缝发育程度是形成网状裂缝的关键。而当套管水力出口处层理面黏结力较弱或微裂缝发育时,尽管垂直层理方向为最大地应力,但在水力压力作用下,水力裂缝迅速贯通层理面,形成垂直最大地应力方向的主裂缝(如图 9(a)所示)。当水力主裂缝沿水平最大地应力方向起裂并延伸时,裂缝方向垂直于

层理面, 而在其延伸过程中, 当遇到弱层理面时, 主裂缝将发生转向而沿层理面继续延伸开裂, 从而形成相互交叉的裂缝网络 (如图 9 (b) 所示)。虽然页岩试样压裂后大都形成了网状的水力裂缝, 但同一批次试样的裂缝形态差异较大, 仍需要继续进行大量的重复试验, 以便得到更具规律性的认识。鉴于本文集中在通过一套完整的页岩水力压裂裂缝表征方法对裂缝空间展布形态进行描述, 因此, 仅以 Y-14 试样的试验结果进行详细分析。

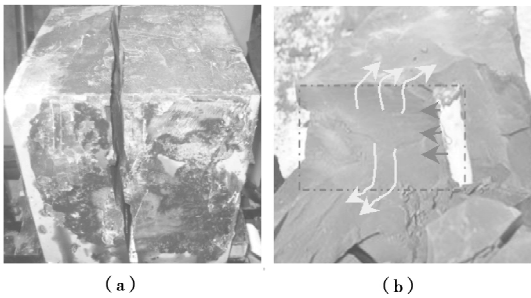


图 9 页岩水力压裂裂缝形态图

Fig. 9 Hydraulic fracture morphology of shale

3.1 泵压曲线分析

以活塞位移为控制方式的水力压裂泵压 - 时间曲线如图 10 所示, 其控制速率为 0.125 mm/s, 即泵压排量为 0.5 mL/s。

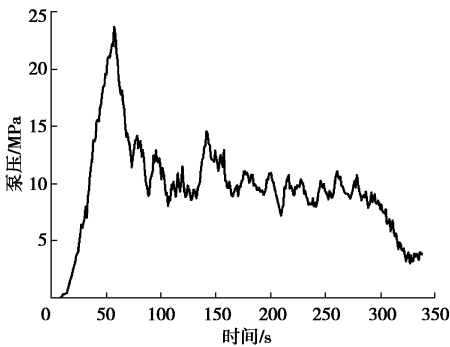


图 10 水力压裂泵压 - 时间曲线

Fig. 10 Curve of pump pressure vs. time

由图 10 可知, 施加水力压力后, 随着注入压裂液的不断增加, 泵压近似呈直线迅速上升, 在约 57 s 时达到破裂压力 23.71 MPa; 当压裂液进入已产生的裂缝后, 随着泵入压裂液的继续增加, 峰值压力急速跌落, 当泵压降低至约 11 MPa 时, 进入锯齿状波动下降阶段, 泵压频繁地波动说明水力裂缝在延伸过程中形成了较多次生裂缝, 而使压裂液有较大量的滤失, 也是页岩在压裂过程中形成网状裂缝的一个明显特征; 290 s 后, 泵压迅速降低, 说明压裂缝已延伸至试样边界, 渗透通道已基本形成; 当压力降至约 4 MPa 后, 泵压进入稳定阶段, 说明水力渗透通道已完全形

成。

3.2 声发射监测

图 11 为水力压裂泵压施加过程中三维空间内声发射监测到的事件分布图, 图 12 为 Y-14 页岩试样水力压裂后的直观效果图。

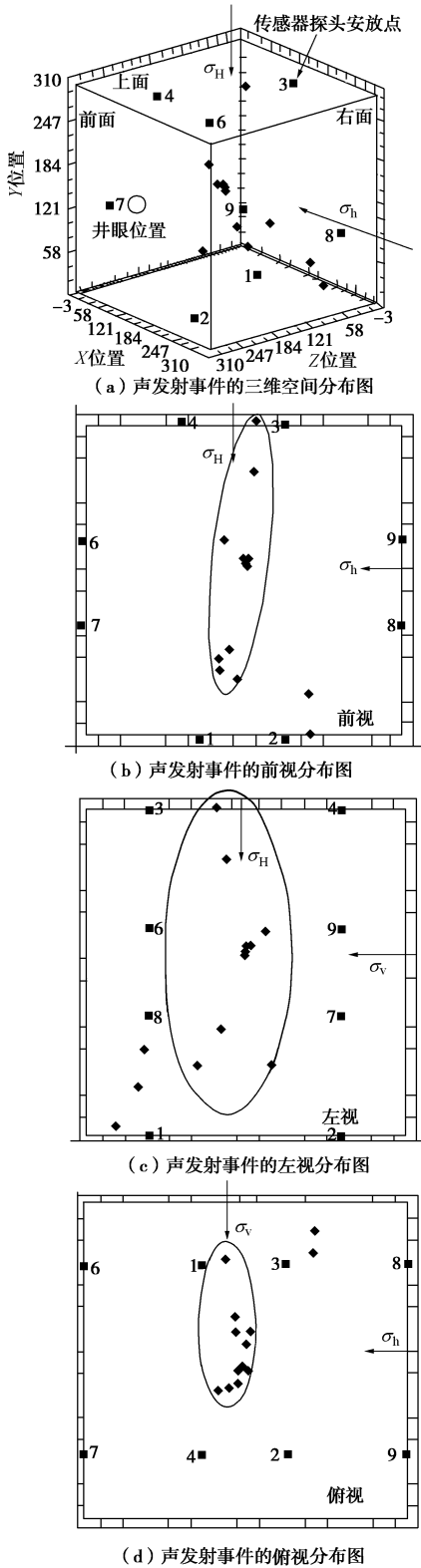


图 11 声发射事件分布图

Fig. 11 Distribution of AE hits in three-dimensional space



图 12 水力压裂后裂缝分布的直观效果图

Fig. 12 Fracture distribution after hydraulic fracture

根据图 11, 12 可知, 虽然声发射监测的事件数不多, 但监测到的事件主要集中在套管割缝处与试样的后半部分, 且事件大致分布在一个垂直于套管的平面内, 这与压裂后产生的主裂缝方向一致。但由于监测到的基本为主裂缝的声发射事件, 而次生裂缝的较少, 因此, 虽然声发射三维定位有一定的有效性, 但其监测效果还需进一步探索提高。

### 3.3 工业 CT 断面扫描

Y-14 试样在试验前完成了 5 个断面的工业 CT 扫描, 其分辨率为  $1024 \times 1024$ , 每个扫描断面平行于试样上下表面、垂直于层理面, 具体扫描位置如图 12 中虚线所示。

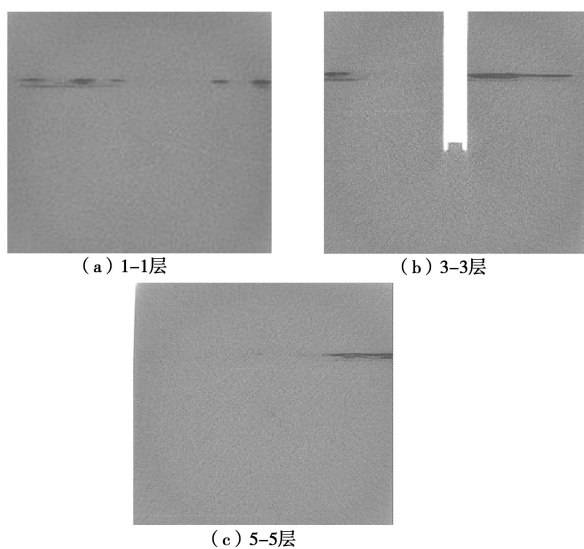


图 13 压裂前工业 CT 扫描

Fig. 13 CT scanning before hydraulic fracture

图 13 仅给出了能观察到微裂缝发育的 3 个压裂前工业 CT 断面扫描图。从图 13 中可看出, 虽然页岩断面的均质性较好, 但均能观察到不太发育的平行于层理面的天然裂缝, 且在试样前部的局部位置有非连续的高密度物质, 根据取样现场情况, 分析认为是充填于层理间的金属矿物, 总体上, 该试样完整性良好。

压裂后仍对压裂前扫描的 5 个断面进行工业 CT 扫描, 其扫描分辨率仍保持为  $1024 \times 1024$ , 其不同断面的裂缝形态如图 14 所示。

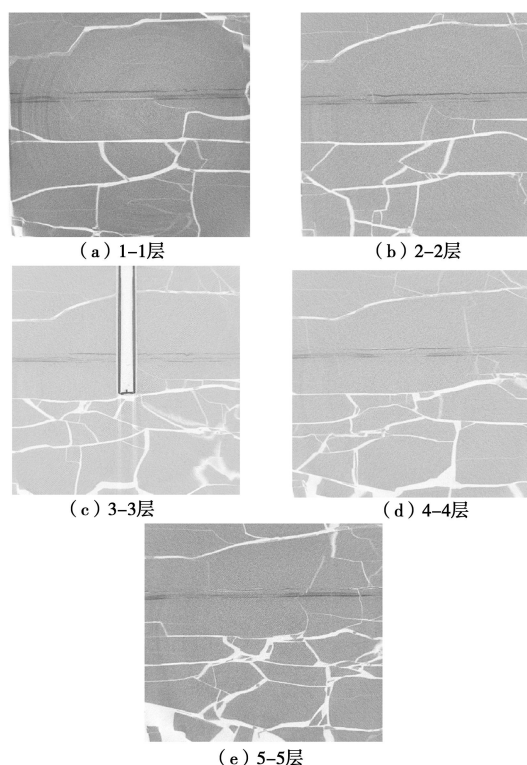


图 14 压裂后工业 CT 扫描

Fig. 14 CT scanning after hydraulic fracture

由图 14 可看出, 水力压裂后, 该试样形成了垂直于井筒套管的主裂缝, 这与声发射监测到的主裂缝方位一致。而在主裂缝和试样后表面之间仍可观察到一条近似平行层理面的贯穿试样表面的明显裂缝, 可视为另一条主裂缝, 且该两条主裂缝都沿水平最大地应力方向延伸; 在两条主裂缝与试样后表面间, 产生了较多的与层理面相交的次生裂缝, 从而形成了页岩的网状裂缝; 在 3-3 层的套管底部, 有几条与水力主裂缝相交的次生裂缝, 这与图 11 中声发射监测到的水力出口处事件数相对较多一致。而在试样的前半部分, 也观察到了一条近似平行于层理面的裂缝, 这可能为页岩内部本身不太发育的微裂缝在加载过程中进一步开裂而形成的。另外, 1-1 层的右上角、4-4 层和 5-5 层的左下角, 均观察到了掉块现象, 这与图 12 显示的相符合。

### 3.4 压裂后剖切

由图 12 可看出, 压裂后、工业 CT 扫描前试样外表面红色示踪剂的痕迹较明显。试样中平行于天然层理的主裂缝与垂直层理的次生裂缝连通后, 形成了相互交叉的裂缝网络。

为直接观察压裂后试样的裂缝形态, 并验证工业

CT 扫描对裂缝表征的有效性, 对压裂后的试样根据水力通道红色示踪痕迹进行了剖切, 通过红色示踪剂观察水力裂缝分布和连通情况, 但由于试样在工业 CT 扫描过程中难免有一定的损伤和破坏, 而使试样进一步破碎, 因此, 此处仅给出试样关键部位的裂缝形态和延伸特征, 如图 15 所示。

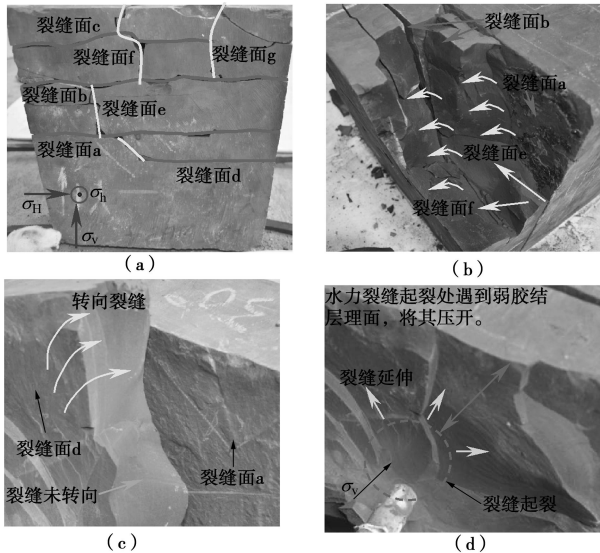


图 15 剖切后的压裂缝

Fig. 15 Cutting fracture after hydraulic fracture

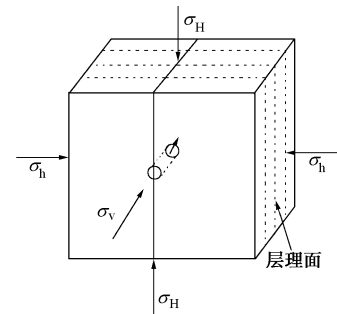
由图 15 (d) 可知, 由于套管水力出口处为层理开裂的天然裂缝, 因此, 水力裂缝起裂于页岩层理面, 即水力裂缝沿垂直于最大地应力方向起裂; 而在水力裂缝沿层理面延伸的过程中, 在地应力作用下, 部分压裂液沿垂直于层理方向发生转向, 从而沟通另一个弱层理面, 进而沿水平最大地应力方向延伸, 而在水力裂缝继续延伸的过程中, 在地应力作用下, 水力裂缝继续发生转向, 进一步沟通弱层理面, 直至水力裂缝扩展至试样表面, 形成纵横交错的网状裂缝, 实现体积压裂。

综合声发射三维空间定位中的事件分布位置、工业 CT 扫描中的裂缝分布和压裂后裂缝描述信息, 可知, 水力裂缝主要集中于试样中、后部位, 可能与试验方案中套管的锚固效应有一定的关系。

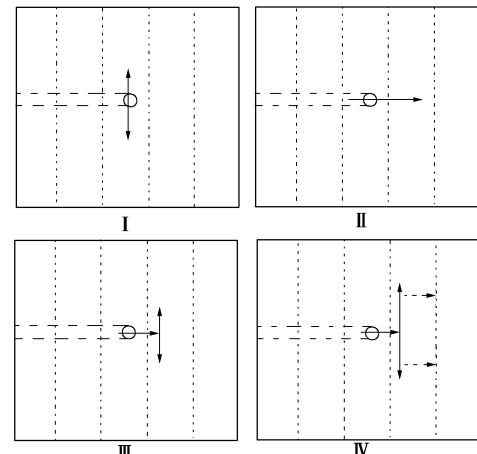
#### 4 页岩网状压裂缝形成机理初探

通过对压裂后页岩裂缝形态的仔细分析, 初步认为页岩水力压裂网状裂缝的形成不仅与地应力差异系数、泵压排量有关, 还与其天然层理面及微裂缝的发育程度等有密切关系。

实际上, 页岩在沉积压实形成过程中, 层间有不同的胶结沉积物, 在地应力差、物性差异、压裂液及自身性质等的影响下, 弱面的力学性质亦有较大差异。



(a) 页岩压裂三向加载示意图



(b) 4种破裂模式 (虚线表示层理面)

图 16 页岩水力裂缝起裂与延伸的 4 种基本模式

Fig. 16 Four modes of hydraulic fracture initiation and extension of shale

因此, 在页岩压裂过程中, 不同层理面对压裂缝的形成及延伸可能都会有不同程度的影响。结合已有的多组压裂试验结果, 综合分析后得到了页岩竖直井水力压裂时的 4 种裂缝起裂与延伸模式, 如图 16 所示, 并在此基础上初步分析了页岩网状压裂缝的形成机理。

I: 水力裂缝沿层理面起裂并延伸, 形成单一裂缝。此破裂模式发生在水力出口处层理面胶结强度较低或微裂缝发育时, 尽管垂直层理面为最大地应力方向, 但仍形成单一裂缝。

II: 水力裂缝沿水平最大地应力方向起裂并延伸, 在延伸过程中, 直接穿过层理面, 形成单一裂缝。此破裂模式发生在层理面胶结性较强, 且层理微裂缝不发育时。

III: 水力主裂缝沿水平最大地应力方向起裂并扩展, 在延伸过程中, 遇到弱层理面后发生转向, 并沿层理面继续扩展, 形成交叉裂缝。此破裂模式多发生在层理面黏结强度较低或微裂缝发育时。

IV: 水力主裂缝沿水平最大地应力方向起裂并扩展, 在延伸过程中, 遇到弱层理面后发生转向; 而在层理面内继续延伸的过程中, 在地应力作用下, 局部裂缝继续转为沿水平最大地应力方向扩展, 直至形成复杂的裂缝网络。此破裂模式多发生在层理面强度适中且缝内压力相对较高时。



综上可知,页岩地层天然裂缝或层理面的发育程度与复杂缝网的形成密切相关,层理面过弱或过强都不利于裂缝网络的形成;对层理面黏结强度适中的地层,地应力的相对大小和方向对裂缝网络的形成有较大的控制作用。真三轴应力条件下,页岩水力裂缝的延伸多为上述 4 种基本模式的复合,压裂缝扩展至层理面强度较低处或微裂缝发育处易发生裂缝的分叉、转向,进而形成与主裂缝相交的次生裂缝或沿层理面的贯穿裂缝,而二者的相互交叉连通,形成了页岩水力压裂的网状裂缝。

对比泵压-时间曲线、声发射监测信息和压裂后试样的裂缝形态可知,泵压峰值后陡然产生的较大落差显示了起裂瞬间较强的能量释放,而声发射监测到的事件数也相对较多。而在裂缝延伸阶段(未穿透试样表面),泵压值却低于水平最小地应力,这可能与产生平行于水平地应力方向的主裂缝和试样内局部微裂缝和弱层理面较发育有关;虽然此阶段声发射活动趋于平静,但页岩复杂的裂缝网络却在此时产生,因此,页岩裂缝网络的形成与泵压排量密切相关,在较低排量维持较低泵压时,利于压裂缝的转向,且更易形成裂缝网络,达到体积压裂。

## 5 结 论

本文通过一套适用于页岩室内压裂的物理模拟试验系统,开展了页岩室内真三轴水力压裂试验,初步认识了页岩水力裂缝的延伸规律和空间展布形态,并初步揭示了其水力压裂裂缝网络的形成机理。得到以下 3 点结论。

(1) 页岩压裂试验中,泵压曲线在初始段上升速度较快,达到破裂点时,较强的能量瞬间释放,声发射事件数较多,而后迅速下降;在裂缝延伸的过程中,泵压曲线呈锯齿状波动发展,直至渗透通道形成,而其典型的锯齿状波动曲线与网状裂缝的形成密切相关,是页岩体积压裂的一个明显特征。

(2) 页岩水力裂缝的起裂与延伸主要有 4 种基本模式,而复杂缝网的形成多为 4 种基本模式的复合。天然裂缝或层理面的发育程度与复杂缝网的形成密切相关,水力裂缝在层理面内的分叉、转向以及沟通天然裂缝是形成裂缝网络的关键,而层理面过弱或过强都不利于裂缝网络的形成;对层理面粘结强度适中的地层,地应力对裂缝网络的形成有较大的控制作用。

(3) 页岩裂缝网络的形成与泵压排量密切相关,可通过控制排量的大小来控制裂缝形态;在较低排量维持较低泵压时,压裂缝易于转向,且更易形成裂缝

网络,达到体积压裂。

## 参考文献:

- [1] NELSON P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones and shales[J]. A A P G Bulletin, 2009, **93**(3): 329 - 340.
- [2] 马永生,冯建辉,牟泽辉,等. 中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J]. 中国工程科学, 2012, **6**(4): 22 - 30. (MA Yong-sheng, FENG Jian-hui, MOU Ze-hui, et al. Potential and current situation of unconventional oil and gas resource in Sinopec[J]. Engineering Sciences, 2012, **6**(4): 22 - 30. (in Chinese))
- [3] 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**(2/3): 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**(2/3): 393 - 399. (in Chinese))
- [4] 邹才能,董大忠,王社较,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, **37**(6): 641 - 653. (ZOU Cai-neng, DONG Da-zhong, WANG She-jiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, **37**(6): 641 - 653. (in Chinese))
- [5] 王公昌,姜瑞忠,徐建春. 当前页岩气资源开发的瓶颈及建议[J]. 复杂油气藏, 2012, **5**(2): 10 - 14. (WANG Gong-chang, JIANG Rui-zhong, XU Jian-chun. Analysis and advice for shale gas development[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, **5**(2): 10 - 14. (in Chinese))
- [6] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 页岩储层压裂改造的非常规理论与技术构想[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, **44**(6): 1 - 6. (XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang, et al. Unconventional theories and strategies for fracturing treatments of shale gas strata[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, **44**(6): 1 - 6. (in Chinese))
- [7] WARPINSKI N R, TEUFEL L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1987, **39**(2): 209 - 220.
- [8] WARPINSKI N R. Hydraulic fracturing in tight, fissured media[J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, **42**(2): 146 - 151.
- [9] WARPINSKI N R, LORENZ J C, SANDIA N, et al.



- Examination of a cored hydraulic fracture in a deep gas well[J]. SPE Production & Facilities, 1993, **8**(3): 150 - 158.
- [10] MAHRER K D. A review and perspective on far-field hydraulic fracture geometry studies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, **24**(1): 13 - 28.
- [11] BEUGELSDIJK L J L, DE PATER C J, SATO K. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium[C]// SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management. Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [12] BLANTON T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[C]// SPE Unconventional Gas Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers, 1982.
- [13] BLANTON T L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs[C]// SPE Unconventional Gas Technology Symposium. Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [14] FISHER M K, WRIGHT C A, DAVIDSON B M, et al. Integrating fracture mapping technologies to improve stimulations in the barnett shale[J]. SPE Production & Facilities, 2005, **20**(2): 85 - 93.
- [15] FISHER M K, HEINZE J R, HARRIS C D, et al. Optimizing horizontal completions in the Barnett shale with microseismic fracture mapping[J]. Journal of Petroleum Technology, 2005, **57**(3): 41 - 42.
- [16] MAXWELL S C, URBANCIC T I, STEINSBERGER N, et al. Microseismic imaging of hydraulic fracture complexity in the Barnett shale[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [17] URBANCIC T I, MAXWELL S C. Microseismic imaging of fracture behavior in naturally fractured reservoirs[C]// SPE/ISRM Rock Mechanics Conference. Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [18] MAYERHOFER M J, LOLON E P, YOUNGBLOOD J E, et al. Integration of microseismic-fracture-mapping results with numerical fracture network production modeling in the Barnett Shale[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [19] MAYERHOFER M J, LOLON E, WARPINSKI N R, et al. What is stimulated reservoir volume?[J]. SPE Production & Operations, 2010, **25**(1): 89 - 98.
- [20] 陈 勉, 庞 飞, 金 衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(增刊): 868 - 872. (CHEN Mian, PANG Fei, JIN Yan. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(S0): 868 - 872. (in Chinese))
- [21] 周 健, 陈 勉, 金 衍, 等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究[J]. 石油学报, 2007, **28**(5): 109 - 113. (ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, **28**(5): 109 - 113. (in Chinese))
- [22] 姚 飞, 陈 勉, 吴晓东, 等. 天然裂缝性地层水力裂缝延伸物理模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, **30**(3): 83 - 86. (YAO Fei, CHEN Mian, WU Xiao-dong, et al. Physical simulation of hydraulic fracture propagation in naturally fractured formations[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, **30**(3): 83 - 86. (in Chinese))