

页岩气藏缝网压裂物理模拟的声发射监测初探

侯冰^{1,2}, 陈勉^{1,2}, 谭鹏^{1,2}, 李丹丹^{1,2}

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学石油工程学院, 北京 102249)

摘要:水力压裂模拟实验中,对水力裂缝的监测和识别是研究储层裂缝形态的基础。利用室内大尺寸真三轴水力压裂物理模拟装置对300 mm×300 mm×300 mm立方体页岩试样开展体积压裂实验,建立多通道声发射实验监测系统,在试样两个对称侧面布置声发射探头,采集实验过程中裂缝破裂时的声波信号,对裂缝缝网形成过程进行三维动态实时跟踪,可以明确水力裂缝起裂和裂缝扩展形态;再结合声发射计数曲线和泵压曲线可以实时监测水力裂缝不同扩展阶段,判别水力裂缝与天然裂缝相互沟通过程。监测过程发现,声发射累积次数最高点先于破裂压力点出现,水力裂缝扩展接收的声发射信号多于天然裂缝开启过程,地层破裂后泵压曲线的波动可以识别裂缝之间的沟通程度,打开试样观察示踪剂的分布特征进一步验证了声发射监测结果。

关键词:页岩试样;声发射定位;水力压裂;裂缝扩展;泵压曲线

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A

引用格式:侯冰,陈勉,谭鹏,等.页岩气藏缝网压裂物理模拟的声发射监测初探[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(1):66-71.

HOU Bing, CHEN Mian, TAN Peng, et al. Monitoring of hydraulic fracture network by acoustic emission method in simulated tri-axial fracturing system of shale gas reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 66-71.

Monitoring of hydraulic fracture network by acoustic emission method in simulated tri-axial fracturing system of shale gas reservoirs

HOU Bing^{1,2}, CHEN Mian^{1,2}, TAN Peng^{1,2}, LI Dandan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In the experiments to simulate hydraulic fracturing, monitoring and identification of the hydraulic fractures are fundamental to the study of the fracture morphology. Large scale hydraulic fracturing experiments were conducted using an indoor tri-axial physical simulation apparatus with 300 mm×300 mm×300 mm shale rock samples. A multi-channel acoustic emission monitoring system was applied, and the acoustic signals induced in the fracturing experiment were collected using acoustic sensors on the two sides of the sample to set up a 3D dynamic real-time monitoring system. The acoustic positioning technique can clearly recognize the initiation, orientation and morphology of the hydraulic fractures developed. Based on the data analysis of combined acoustic curve and pump pressure curve, the different stages of hydraulic fracture propagation can be monitored in real time, and the intercommunication between hydraulic fractures and natural fractures can be also recognized. The experimental results show that the peak point of the acoustic emission cumulative intensity appears prior to fracture pressure point and more signals are received during hydraulic fracture propagation comparison to the initiation of natural fracture. The fluctuation of pump pressure curve after fracturing can be used to recognize the interaction among fractures. The monito-

收稿日期:2014-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51204195,51234006);北京青年英才计划(YETP0672);中国石油大学(北京)科研基金项目(2462011KYJJ0207)

作者简介:侯冰(1979-),男,副研究员,博士,硕士生导师,从事石油工程岩石力学研究。E-mail: houbing9802@163.com。

通讯作者:陈勉(1962-),男,教授,博士,博士生导师,从事石油工程岩石力学研究。E-mail: chenmian@vip.163.com。

ring results of acoustic emission can be further verified by observing the tracer's distribution after breaking the rock sample.

Keywords: shale rock; acoustic emission positioning; hydraulic fracturing; fracture propagation; pump pressure curve

脆性页岩储层采用水平井分段压裂会产生形态复杂的裂缝网络,大量的实验和理论研究表明,储层中发育的层理、断层和天然裂缝等非连续结构面对水力裂缝扩展路径会产生显著的影响。水力裂缝遇到天然裂缝后,其扩展模式常表现为停止扩展、沿着天然裂缝扩展和穿透天然裂缝扩展,学者因此提出了判别这些扩展模式的力学准则^[1-4]。Liu^[5]在Blanton^[2]准则的基础上,在预置裂缝网络的混凝土试样中开展水力压裂实验,得到了张开天然裂缝、穿透天然裂缝和沿着天然裂缝滑移的临界净液压力。在大排量快速压裂过程中,页岩地层中的水力裂缝极有可能在应力偏转或地层微观结构变化时发生分叉扩展,分叉后的扩展裂缝因排量和天然裂缝特征等因素的影响可能进一步加速扩展并再次分叉^[6-8]。程万等^[9]总结了裂缝平面扩展准则的优缺点,提出了三维空间下水力裂缝穿透天然裂缝的判别准则,为页岩储层地层倾角和走向角对网络裂缝扩展的影响提供指导。当水力裂缝沿着天然裂缝两端扩展时,天然裂缝容易被激活,水力裂缝复杂程度大幅提升,容易形成水力裂缝网络^[10-12]。低渗页岩储层对滑溜水中的示踪剂不敏感,裂缝网络扩展形态很难通过观察示踪剂分布进行描述,开展声发射定位技术有助于无损监测网络裂缝扩展。利用声发射事件定位可以确定岩石破裂的空间位置^[13],声发射的室内监测裂缝扩展方法相当于小尺度的微地震监测技术^[14]。在岩石力学领域,Lockner^[15]利用声发射技术对花岗岩的水力压裂实验过程进行监测,初步判断了裂缝扩展形态和裂缝扩展速率。Pettitt和King等^[16-17]利用改进的真三轴加载系统能实现对岩石破坏过程中的声发射事件的测量,分析拉伸和剪切破坏分别在裂缝扩展中的主导性。有效识别声发射监测信号是研究网络裂缝扩展的关键,笔者利用声发射定位技术识别真三轴加载的页岩露头试样压裂时产生的声发射信号,结合泵注压力曲线,实时判断水力裂缝起裂、扩展过程中与天然裂缝的交互过程,为优化缝网压裂中的施工参数提供参考。

1 声发射定位方法

声发射定位监测技术的原理是根据不同位置的探头接收到信号的时间差,结合声波在试样介质中的传播速度,运用定位算法反演声发射事件的三维

空间位置,进而实现声发射定位。该技术可用于实时监测水力裂缝扩展路径。压裂时岩石试样内部的破裂位置与声发射事件的源定位密切相关,影响声发射定位精度的主要因素包括硬件设备、信号预处理和定位算法。

1.1 声发射监测系统

本实验采用美国物理声学公司(PAC)生产的SAMOSTM声发射系统,可提供8个通道,自动进行实时高效率高精度的声发射特征提取、波形采集及处理。声发射探头型号为R6a,频域为35~100 kHz;前置放大器型号为PAC-2/4/6,实验过程中增益选择40 dB。结合真三轴实验系统对页岩露头试样开展水力压裂模拟实验,并利用配套的AEwin TM软件对压裂实验过程中产生的声发射(acoustic emission, AE)事件进行统计,并对其源参数进行计算,从而确定AE源的空间位置。

为保证探头与页岩试样表面紧密接触,在页岩试样与加载压力板之间放置预制孔眼的钢板,并在钢板上开有引线槽,防止加压过程中损坏探头信号线(图1)。



图1 声发射探头的布置

Fig.1 Arrangement of AE sensors

1.2 信号预处理

利用断铅实验测量页岩岩样波速。采用0.5 mm、硬度为2 H的铅芯折断信号作为模拟源,铅芯伸出长度约为2.5 mm,与岩样表面夹角约为30°,在离传感器中心100±5 mm处折断,采集声发射信号。通过断铅点和两个探头距离差与两个探头接收到信号的时间差值计算出4块岩样声波速度分别为3876、4011、3863和3953 m/s,与页岩地层中声波传播速度相近,表明信号可靠性强。将岩样放入实验架后,为确认传感器的耦合质量和检测电路的连续性,再次做断铅实验,确保探头与岩样表面耦合良好,保证信号采集质量。

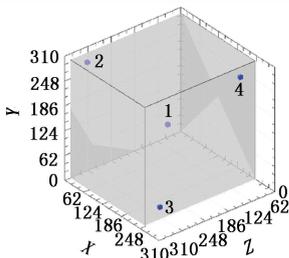
由液压稳压源施加模拟地应力的过程中,须提取室内噪声作为设置声发射门槛的参考依据,本实验中的噪声约为 42 dB,故声发射门槛设置为 40 dB。在开始泵注压裂液的同时启动声发射仪监测泵注过程中的声发射信号,同时启动与 MTS 控制器连接的数据采集系统,记录泵注压力和排量参数。为减少压裂液进入井筒过程中裂隙闭合释放出的声发射事件,以及渗流所产生的噪声信号等因素对岩石破裂信号采集的影响,在泵注压裂液过程中采取停泵稳压一段时间再继续泵注压裂液,直到岩样破裂。

1.3 传感器定位

实验时在立方体岩样相互对称的两个面上贴有 4 个互相对称的声发射探头,可记录声发射事件参数与波形并进行实时定位,监测可以覆盖到整个岩样内部的微破裂信号。根据声发射探头的空间位置,在 AEwin 软件中分别输入岩样的尺寸、声发射探头坐标等参数(表 1)。实验室采用的定位方法是收缩网格搜索法,其原理是首先对一个初始网格进行搜索找到最小误差点,即全局最小偏差,在这一点周围会产生一个更精细的收缩网格并进行再次网格搜索,直到达到定义精度为止。

表 1 结合声发射监测的压裂模拟实验参数设置

Table 1 Parameter settings in fracturing simulated experiment with AE monitor

通道	传感器坐标/mm			传感器空间位置
	X	Y	Z	
1	0.0	30.0	37.5	
2	0.0	268.0	252.5	
3	246.0	30.0	252.5	
4	246.0	268.0	252.5	

2 实验结果讨论

2.1 缝网压裂裂缝扩展形态

四川龙马溪组页岩储层相关参数如下:弹性模量为 35 ~ 45 GPa,泊松比为 0.16 ~ 0.27,水平最小地应力约为 46 MPa,水平最大地应力约为 61 MPa,上覆岩层应力为 50 ~ 74 MPa,地层埋深为 2.6 ~ 3.5 km,水力压裂现场施工排量为 10 ~ 15 m³/min,泵注时间约为 200 min,压裂液黏度为 3 mPa·s,水力裂缝长度约为 200 m。页岩露头弹性模量为 40 GPa,

泊松比为 0.18,脆性特征显著,岩样尺寸为 300 mm × 300 mm × 300 mm。结合现场测试数据,采用相似准则模拟不同深度地层的压裂实验,3 块岩样的室内水力压裂实验参数见表 2,采用模拟大排量(0.326 mL/s)压裂岩石至破裂,水力压裂实验采用的压裂液是现场所用的滑溜水压裂液体系,包括降阻剂、破胶剂、杀菌剂和防水锁剂,其中添加少量示踪剂。

表 2 水力压裂物模实验参数

Table 2 Parameter settings in tri-axial fracturing experiment

编号	σ_V / MPa	σ_H / MPa	σ_h / MPa	黏度 μ / (mPa·s)
1	20	10	8	2.0
2	12	10	8	2.0
3	10	12	8 </td <td>6.5</td>	6.5
4	15	10	8	2.0

页岩储层压裂时裂缝扩展过程中出现张开型与剪切滑动型扩展,表现为沟通天然裂缝后发生转向、分叉,形成一级分支裂缝后遇到新的天然裂缝再形成二级分支裂缝,以此类推,裂缝相互交错形成复杂的网状裂缝系统。页岩储层网络裂缝扩展规模与天然裂缝发育特征、应力场、储层脆性和压裂施工参数等密切相关。为研究不同裂缝扩展形态的三维声发射监测特征,本实验选取 4 块不同裂缝扩展形态的试样进行针对性研究(图 2)。实验结果显示,试样压裂后均存在与最小水平地应力大致垂直的主裂缝,且在天然裂缝附近存在不同程度的扭曲和转向

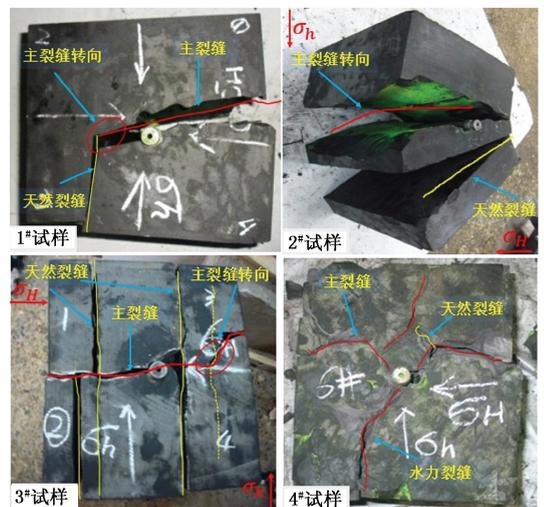


图 2 压裂后的页岩

Fig. 2 Shales after fracturing

趋势。水力裂缝扩展形态分别为:1# 试样水力裂缝沟通天然裂缝后转向滑移;2# 试样为张开型单一主裂缝,裂缝扩展中受天然裂缝影响逐渐发生偏转;3#

试样水力裂缝与多条天然裂缝沟通分叉后形成纺锤形缝网体;4#试样水力裂缝沟通多条微裂缝弱面形成径向网状裂缝。由此可见,页岩压裂后的裂缝形态较复杂,某些条件下可形成非平面的、不规则的多条裂缝组合在一起的复杂缝网体,这种三维空间的裂缝缝网展布延伸是页岩储层改造的关键。

水力压裂泵压曲线如图3所示。观察泵压曲线发现,页岩试样压裂过程中泵压在达到峰值压力前后曲线均会出现波动,这与水力裂缝是先压裂岩石本体还是压开天然裂缝等脆弱面相关。当压裂岩石本体后水力裂缝再沟通天然裂缝,泵压曲线会在达到峰值压力后出现压力波动现象,扩展过程中沟通的天然裂缝越多,压降曲线波动形态越复杂,与1#

和2#曲线趋势相同。当水力裂缝沟通井筒周围的天然裂缝后,岩石本体再被压裂,泵压曲线会在峰值压力前出现压力波动现象,由于试样尺寸影响,压裂岩石本体后泵压迅速下降,与3#和4#曲线趋势相同。由于天然裂缝等非连续复杂结构面的强度比岩石本体低,水力裂缝扩展到这里所需要的能量更少。水力裂缝扩展到不规则断裂体处时增加了由于能量过剩发生必然分叉和不规则影响发生偶然分叉的可能性。裂缝的分叉行为与天然裂缝发育程度和外部加载排量有关,通过改变控制加载条件可以促使裂缝不断分叉扩展。页岩试样室内压裂的压降曲线波动特征为油田现场通过分析压裂施工曲线和评价储层中近井筒附近的非连续面的特征提供一种新思路。

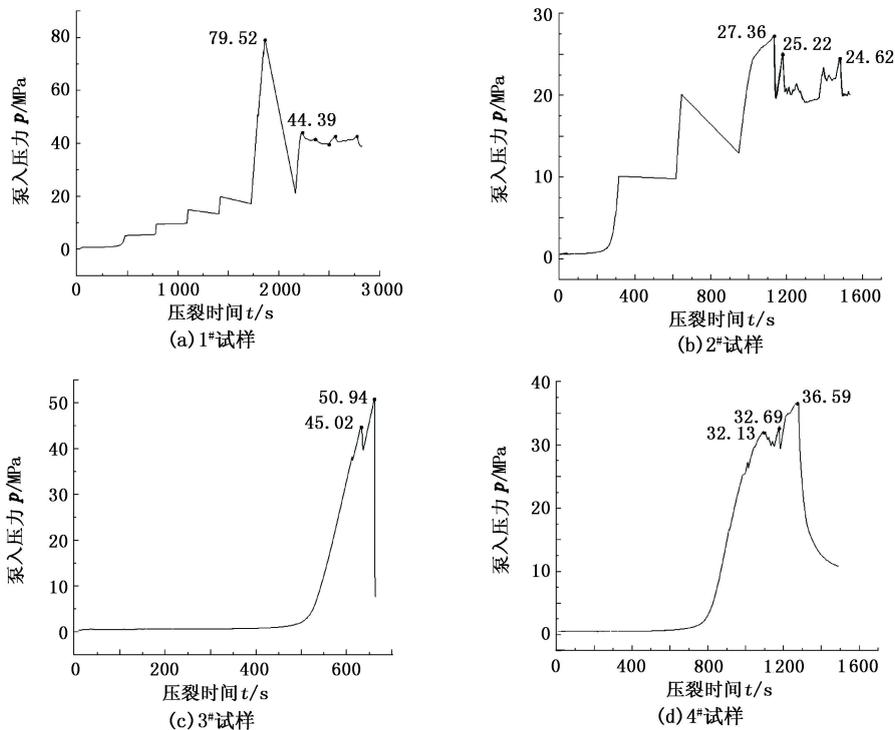


图3 水力压裂泵压曲线

Fig. 3 Pump pressure curves in hydraulic fracturing

2.2 声发射监测特征

结合声发射三维定位信息与试样压裂后示踪剂分布形态,深入分析水力裂缝起裂扩展特征。声发射监测水力裂缝的结果如图4所示。

1#试样主裂缝左翼扩展时遇到天然裂缝后直接沿着天然裂缝转向扩展,声发射事件点集中在主裂缝延伸方向,并偏向于2号和3号传感器的一端,声发射事件密集,呈现窄椭圆条形带,表明在水力裂缝遭遇天然裂缝,发生转向扩展的过程中,存在比较显著的摩擦、破坏和振动,能量释放强烈;2#试样在1号和4号传感器的一端声发射信号较另一端密集,

与主裂缝中靠近1和4号传感器的一端荧光粉颜色更深、波及面积更大的实际压裂效果相符,表明水力压裂产生一条主裂缝。在岩样内部压开裸眼井段的地方,主裂缝沟通旁边的一条天然裂缝,声发射事件点沿主裂缝延伸方向分布范围扩宽,呈现宽椭圆条形带;3#试样压裂效果最为复杂,在声发射定位图中不能显示明显的水力裂缝走向,说明复杂网状裂缝的定位更加困难。结合示踪剂分布特征发现,在压裂后形成一条主裂缝,主裂缝右翼穿透天然裂缝后与张开的另一条天然裂缝(右)沟通后发生转向,左翼沟通多条天然裂缝。声发射事件点也主要集中在

与主裂缝延伸方向相垂直的区域。4#试样水力压裂后由于受到近井筒附近天然裂缝的影响,水力裂缝沟通了多条较小尺度的天然裂缝后呈径向网状缝形态,声发射事件点呈发散状圆形分布。声发射信号定位的难点与传感器的数量、页岩非均质性和天然裂缝发育程度等有关。水力裂缝压裂岩石时能量最高,该区域声发射事件点较多,开启天然裂缝所需的能量较低,因此沿天然裂缝扩展的位置声发射事件点少。

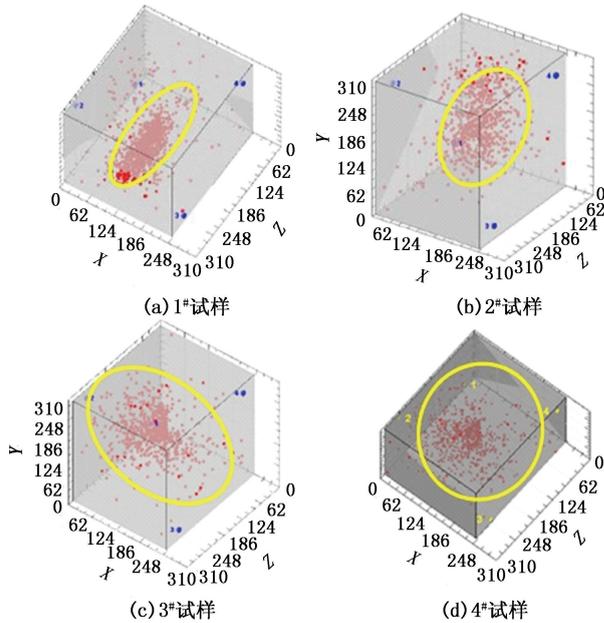


图4 声发射监测水力裂缝的结果

Fig.4 Results of fracturing simulated experiment with AE monitor

通过采集到的声发射撞击次数与压降曲线(图5),以2#试样为例进一步分析页岩水力裂缝扩展规律。为减少噪声信号,在泵注压裂液过程中,每增加10 MPa,须稳压5 min后继续泵注压裂液。整个实验过程中声发射次数不仅在试样压开瞬间发生突变,在稳压过程中的突变现象更明显,尤其是562~962 s(两条红线之间的时间段),可知低黏度压裂液进入裂缝及渗流过程中出现声发射现象。裂缝形成前后声信号急剧增多,形成之后逐渐降低,探测信号以破裂时最多,压力波动和声发射次数的突变相对应,如27.39和25.24 MPa两点对应着声发射过程声发射计数的两个峰值。试样被压开后,声发射现象并未停止,原因是试样内部应力场寻求新的应力平衡,有轻微的错动或摩擦,并且低黏度的压裂液在试样内部压开的裂缝或天然裂缝、节理内渗流、运动,产生声发射现象。

在现场水力压裂施工中,通过微地震监测判断

水力裂缝的扩展形态及沟通范围,Warpinski^[18]结合实际页岩储层微地震监测得到水力裂缝扩展形态,分为单一裂缝、复杂多裂缝、沟通天然裂缝的复杂裂缝网络。本实验的页岩水力裂缝的监测结果与Warpinski通过用微地震方法对压裂后水力裂缝沟通效果的描述有较好的一致性。

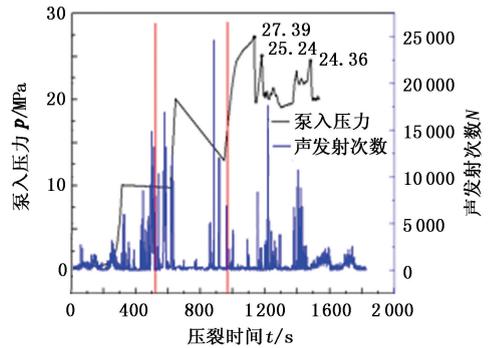


图5 4#试样压裂的压力-时间-声发射计数曲线

Fig.5 Pressure-time-hit curve of 4# shale sample

3 结论及建议

(1)页岩地层的水力裂缝在穿透天然裂缝时的转向过程和主裂缝动态分叉是使整体裂缝形态变得复杂的主要因素。在监测裂缝网络的瞬间扩展形态时,需要合理优选多个声发射探头以及优化空间布置,并在岩石试样粘贴应变片,测试压裂过程中岩石的变形。

(2)页岩试样压裂时,泵压曲线在达到峰值压力前出现波动,这是由于水力裂缝首先开启井筒周围天然裂缝;而在达到峰值压力后出现波动则与压裂后沟通天然裂缝的规模相关。

(3)AE点积累事件数上升趋势与泵压升高相对应,AE积累事件数的峰值点出现在泵压达到峰值破裂压力前,表明此时岩石内部已经出现很多微观裂缝,产生微破裂现象,峰值压力点是微观裂缝突然贯通形成宏观裂缝的表象。

(4)在水力裂缝起裂扩展的方向上声发射点集中,而沿着天然裂缝扩展方向上的信号比较微弱,在压裂前对岩石进行CT扫描重构试样内部天然裂缝,结合声发射监测结果会提高页岩网络裂缝预测精度。

参考文献:

[1] RENSHAW C E, POLLARD D D. An experimentally verified criterion for propagation across unbounded fric-

- tional interfaces in brittle, linear elastic materials [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32 (3): 237-249.
- [2] BLANTON T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures [R]. SPE 10847, 1982.
- [3] GU H, WENG X. Criterion for fractures crossing frictional interfaces at non-orthogonal angles; 44th U. S. Rock Mechanics Symposium and 5th U. S.-Canada Rock Mechanics Symposium, 27-30 June, 2010, Salt Lake City, Utah [R]. Salt Lake City: ARMA, 2010.
- [4] HOU Bing, CHEN Mian, WANG Zheng, et al. Hydraulic fracture initiation theory for a horizontal well in a coal seam [J]. Petroleum Science, 2013, 10(2): 219-225.
- [5] LIU Zhiyuan, CHEN Mian, ZHANG Guangqing. Analysis of the influence of a natural fracture network on hydraulic fracture propagation in carbonate formations [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47 (2): 575-587.
- [6] TALEGHANI A D, OLSON J E. Numerical modeling of multistranded-hydraulic fracture propagation: accounting for the interaction between induced and natural fractures [R]. SPE 124884, 2009.
- [7] TALEGHANI A D. Modeling simultaneous growth of multi-branch hydraulic fractures; 45th U. S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, 26-29 June, 2011, San Francisco, California [R]. San Francisco: ARMA, 2011.
- [8] 陈勉. 页岩气储层水力裂缝转向扩展机制 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(5): 88-94.
CHEN Mian. Re-orientation and propagation of hydraulic fractures in shale gas reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 88-94.
- [9] 程万, 金衍, 陈勉, 等. 三维空间中水力裂缝穿透天然裂缝的判别准则 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 1-6.
CHENG Wan, JIN Yan, CHEN Mian, et al. A criterion for a hydraulic fracture crossing a natural fracture in a 3D space and its field application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 1-6.
- [10] 赵海峰, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气藏网状裂缝系统的岩石断裂动力学 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 465-470.
ZHAO Haifeng, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Rock fracture kinetics of the fracture mesh system in shale gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 465-470.
- [11] KESHAVARZI R, MOHAMMADI S, BAYESTEH H. Hydraulic fracture propagation in unconventional reservoirs—the role of natural fractures; 46th U. S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, 24-27 June, 2012, Chicago, Illinois [R]. Chicago: ARMA, 2012.
- [12] KESHAVARZI R, JAHANBAKHSI R. Real-time prediction of complex hydraulic fracture behaviour in unconventional naturally fractured reservoirs [R]. SPE 163950, 2013.
- [13] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 945-946.
ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruifu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 945-946.
- [14] BENSON P M, VINCIGUERRA S, MEREDITH P G, et al. Laboratory simulation of volcano seismicity [J]. Science, 2008, 322(5899): 249-252.
- [15] LOCKNER D, BYERLEE J D. Hydrofracture in weber sandstone at high confining pressure and differential stress [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(14): 2018-2026.
- [16] PETTITT W S, KING M S. Acoustic emission and velocities associated with the formation of sets of parallel fractures in sandstones [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 151-156.
- [17] KING M S, PETTITT W S, HAYCOS J R, et al. Acoustic emissions associated with the formation of fracture sets in sandstone under polyaxial stress conditions [J]. Geophysical Prospecting, 2012, 60(1): 93-102.
- [18] WARPINSKI N R, MAYERHOFER M J, VINCENT M C, et al. Stimulating unconventional reservoirs: maximizing network growth while optimizing fracture conductivity [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(10): 39-51.

(编辑 李志芬)