

基于室内水力压裂试验的水平井起裂模式研究

王 磊¹, 杨春和^{1,2}, 郭印同¹, 衡 帅¹, 魏元龙², 侯振坤², 李 丹³

(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. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400041; 3. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065)

摘要: 为研究水平井水中水力裂缝的起裂模式, 利用露头介壳灰岩开展室内水平井水力压裂试验, 通过压裂液中添加示踪剂、泵压曲线分析、声发射监测定位、压后试样剖切观察等手段对井壁处水力裂缝的起裂和扩展现象进行描述和分析。得到以下结论: (1) 水力裂缝的起裂模式可归纳为 3 类: I 型——单一横向裂缝、II 型——多条横向裂缝、III 型——纵横交叉裂缝。(2) 每种起裂模式有特定类型的泵压曲线与之对应: I 型起裂模式对应的起裂压力较小, 起裂后压力有较大幅度跌落; II 型起裂模式对应的起裂压力较大, 起裂后压力持续升高, 波动剧烈; III 型起裂模式对应的起裂压力较大, 但起裂后压力波动较小。(3) 试样中水力裂缝的起裂模式具有随机性, 且起裂压力具有较大的离散性。(4) 声发射的活动性能够较好地反映水力裂缝的起裂扩展, 水力裂缝起裂的瞬间, 声发射活动性最强。(5) 声发射事件点子密集分布的区域与实际的水力裂缝位置有较好的一致性, 可利用声发射定位结果初步判断水力裂缝的分布。(6) 在较高的排量下, 水平井更容易形成单一横向裂缝, 而在低排量下水力裂缝的起裂形态可能更趋向于复杂, 排量是影响水平井起裂模式的一个关键因素。(7) 可尝试结合现场压裂泵压曲线推测储层水力裂缝的起裂与扩展。

关键词: 岩石力学; 水力压裂; 水平井; 起裂模式; 泵压曲线; 声发射

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)增 2-3624-09

INVESTIGATION ON FRACTURE INITIATION MODES OF HORIZONTAL WELLS BASED ON LABORATORY HYDRAULIC FRACTURING TEST

WANG Lei¹, YANG Chunhe^{1,2}, GUO Yintong¹, HENG Shuai¹, WEI Yuanlong², HOU Zhenkun², LI Dan³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400041, China; 3. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China)

Abstract: In order to investigate the initiation modes of hydro-fractures in horizontal wells, Laboratory hydraulic fracturing test was carried out using outcrop shelly limestone to simulate horizontal well hydraulic fracturing. The phenomena of fracture initiation and propagation around the horizontal wellbore were described and analysed by adding tracer to the fracturing fluid, analysing pumping curve, arranging AE monitoring system and splitting sample after test. Conclusions are as follows: (1) The initiation modes of hydro-fractures could be divided into three types: one transverse fracture(mode I), transverse multi-fractures(Mode II), transverse-longitudinal crossed fractures(Mode III). (2) Each hydro-fracture initiation mode has its certain pumping curves. Mode I had a low

收稿日期: 2014-08-25; **修回日期:** 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104144); 国家高技术研究发展计划("863"计划)项目(2013AA064800); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)子课题(XDB10040202)

作者简介: 王 磊(1989-), 男, 2011年毕业于山东农业大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事水力压裂过程中岩石力学方面的研究工作。E-mail: jack1906@hotmail.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1188

breakdown pressure followed by a sharp drop. Mode II had a relatively high breakdown pressure, then the pressure went up and fluctuated dramatically. Mode III also had a high breakdown pressure, but the pressure fluctuated slightly. (3) Among the specimens, the three initiation modes occurred randomly and the breakdown pressures were dispersed. (4) The AE activity could reflect the initiation and propagation of hydro-fractures and reached its peak value at the fracture initiation moment. (5) The area in which AE events concentrated was in agreement with the actual location of the hydro-fractures. AE locating results could be used to preliminary judge the distribution of hydro-fractures. (6) One transverse hydro-fracture was more likely to be formed at relatively high pumping rate, while the fracture geometry tended to be complex at relatively low pumping rate. Pumping rate is a key factor to determine the initiation mode. (7) It may be feasible to conjecture the initiation and propagation of the hydro-fractures using site fracturing pumping curves.

Key words : rock mechanics ; hydraulic fracturing ; horizontal well ; fracture initiation ; pumping curve ; acoustic emission

1 引 言

通常在致密储层中钻水平井并进行水力压裂,以提高油气采收率。水平井井轴线相对于三向地应力的空间位置和竖直井不同,因此压裂产生的裂缝形态与竖直井有很大不同。

国外于 20 世纪 90 年代开始对水平井开展室内水力压裂试验研究。W. E. Rabaa^[1]利用人造石膏试样研究了不同方位角(井筒与最小水平主应力方向的夹角)和射孔间距对水力裂缝几何形态的影响,认为水平井附近的裂缝形态受井筒方位角和射孔间距的控制。H. H. Abass 等^[2]同样进行了不同方位角下的水平井水力压裂试验,并将裂缝形态归纳为平行多裂缝、转向裂缝、T 型裂缝 3 类。

国内方面,刘建忠等^[3]利用砂岩试样(尺寸 70 mm×70 mm×110 mm)开展了水平井水力压裂物理模拟试验,并对水力裂缝的起裂转向机制进行了力学分析。陈 勉等^[4]组建了大尺寸(300 mm×300 mm×300 mm)真三轴模拟试验系统,开展了室内水力压裂试验。史明义等^[5]对水平井水力裂缝的延伸规律进行了模拟试验,认为裂缝的起裂及近井裂缝形态除了与井筒方位角有关外,还受地应力相对大小的影响。

在声发射监测定位方面,赵兴东等^[6-8]将声发射应用到岩石的基本力学试验中,研究岩石的破裂失稳过程;刘建坡等^[9-10]则侧重于声发射定位技术的改进和优化。陈 勉等^[4]最早将声发射监测定位应用到室内水力压裂中,但文章中未见有关声发射监测效果的内容。与小尺寸岩石试样相比,声发射信号在大尺寸岩石试样中传播时会有更为明显的衰减,同时加载过程中的环境噪音也要比常规岩石力学试

验大很多,这都给监测定位带来很大难度。

总体来说,对水平井室内水力压裂试验的研究并不多,且大部分以石膏或水泥浇筑制成的人工材料试样为主,试样质地均匀,便于开展单因素、多因素的对比研究。然而,水力压裂现场的目的地层都是非均质的,水力裂缝的起裂与扩展必然存在其特殊性,因此,有必要利用天然露头岩石试样开展室内水平井水力压裂试验。此外,前人对压裂泵压曲线的分析相对较少,大都只是给出了一个破裂压力,未对压力曲线的特点进行详细分析,而压力曲线是水力裂缝从起裂到扩展全过程的一个完整的压力响应的记录,其中含有许多关键信息,应当重视对其规律的研究。

本文在介壳灰岩露头水平井室内水力压裂试验的基础上,结合泵压曲线特征、声发射监测定位效果、试样剖切观察等多种手段,重点分析了井壁处水力裂缝的起裂延伸,归纳了水力裂缝的起裂模式,这对深入认识水平井水力压裂的裂缝起裂及延伸规律,具有重要的现实意义。

2 试验设计

2.1 试验系统

室内水力压裂试验系统主要由大型真三轴加载系统、伺服泵压系统、声发射监测定位系统 3 个部分组成(见图 1),详细介绍可参见郭印同等^[11-12]的研究成果。试验过程中,由真三轴加载系统施加模拟三向地应力,待荷载达到预定值后,伺服泵压系统按照设定的排量向试样中注入压裂液,同时对泵压数据进行实时采集,整个水力压裂过程中,由安放在试样表面的 8 个非对称声发射探头监测裂缝的起裂扩展信息。

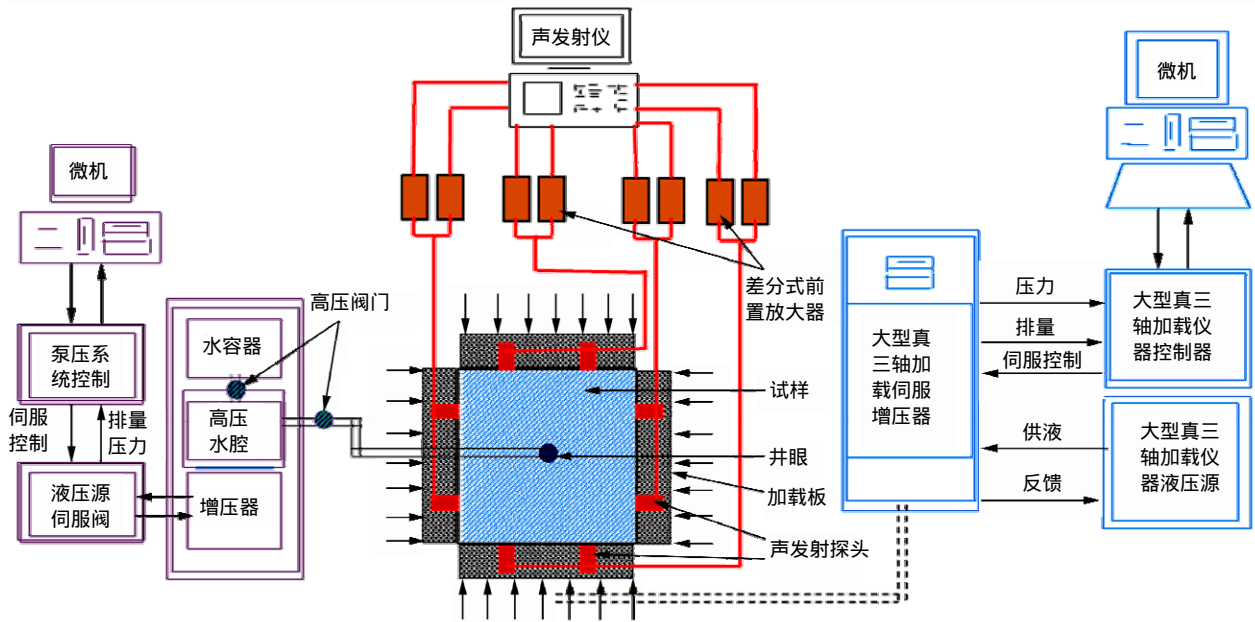


图 1 室内水力压裂试验系统

Fig.1 Experimental system for laboratory hydraulic fracturing

2.2 试样制备

用于压裂试验的试样取自某介壳灰岩储层露头，切割加工成边长 300 mm 的立方块后，取一个面并在该面中心钻孔，孔径 24 mm，孔深 170 mm，采用内径 15 mm，外径 20 mm，长 140 mm 的钢管模拟套管，套管与井壁环空利用环氧树脂黏结，套管底部留有 30 mm 长的裸眼井段。井筒构造如图 2 所示。制备好的试样如图 3 所示。

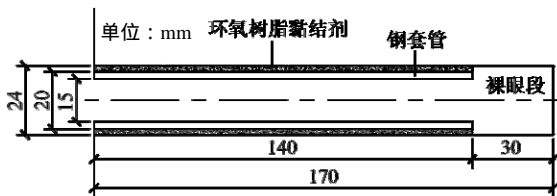


图 2 井筒构造图

Fig.2 Configuration of the wellbore



图 3 制备好的试样

Fig.3 Prepared specimen

2.3 试验参数设定

储层深度实测地应力为垂向 50 MPa，水平最大主应力 45 MPa，水平最小主应力 35 MPa，考虑到加载过程中施加高应力可能对试样造成进一步的损伤，试验中对三向地应力同步缩小 2.5 倍，分别为 20，18，14 MPa。井筒轴线沿着水平最小主应力方向。压裂液采用清水，排量分为 0.5，1.0，2.0 mL/s 三个等级，每级进行 4 组试验，共 12 组试验。试验具体参数见表 1。

表 1 试验参数

Table 1 Parameters of the tests

试样编号	排量/ (mL · s ⁻¹)	压裂液 种类	三向应力/MPa		
			σ_v	σ_H	σ_h
J-4, 7, 10, 13	0.5				
J-3, 5, 8, 11	1.0	水	20	18	14
J-2, 6, 9, 12	2.0				

2.4 声发射监测定位系统布置

本试验的声发射监测定位采用美国物理声学公司的 DiSP 声发射测试系统，整个系统由声发射主机、显示器、前置放大器、传感器探头等部分组成。示意图如图 4 所示。8 个声发射传感器探头的空间布置见图 5，探头的三维坐标见表 2。试验过程中对计数、撞击、能量、事件等参数进行实时采集。

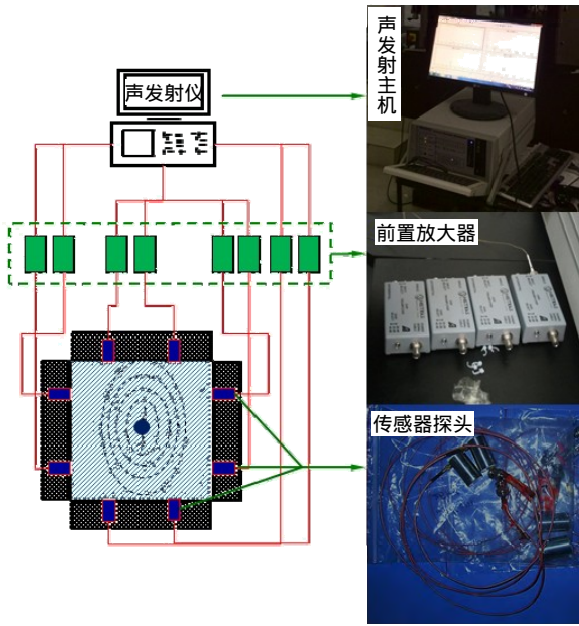


图 4 声发射监测定位系统示意图

Fig.4 Diagram of the AE monitoring and locating system

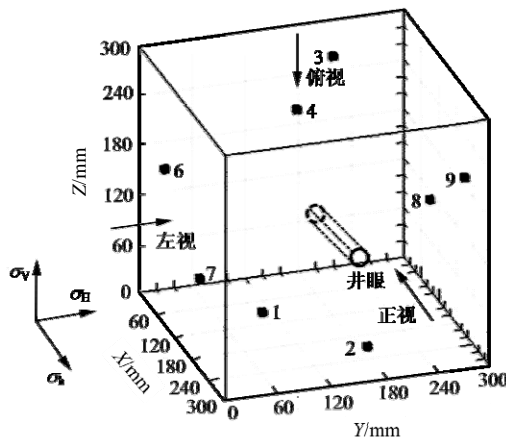


图 5 声发射传感器空间布置

Fig.5 Spatial arrangement of AE sensors

表 2 声发射传感器三维坐标

Table 2 Three-dimensional coordinates of AE sensors

传感器编号	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	90	110	0
2	210	190	0
3	90	190	300
4	210	110	300
6	90	0	190
7	210	0	110
8	90	300	110
9	210	300	190

注：由于 5 号通道出现故障，故避开 5 号通道。

3 压裂结果分析

3.1 裂缝形态分类

根据压裂试验后对试样的剖切，井筒周围的水力裂缝可分为 3 类：单一横向裂缝、多条横向裂缝和纵横交叉裂缝。在本文中，横向裂缝指与井筒轴线垂直的裂缝，纵向裂缝指与井筒轴线平行的裂缝。下面结合压裂后对试样的剖切、泵压曲线特征和声发射监测结果对三类裂缝进行描述。

(1) 单一横向裂缝

以典型试样 J-12 为例进行说明。如图 6 所示，试样只在裸眼段产生一条横向水力裂缝，裂缝表面较为平坦，红色的压裂液几乎布满整个裂缝面，同时，裂缝并不是一个完全的平面，而是存在一定的弯曲。相应的泵压曲线在压力达到最高点(起裂压力)后有较大幅度的跌落，之后压力曲线趋于平稳。这与单一水力裂缝起裂扩展过程的压力响应规律是一致的。

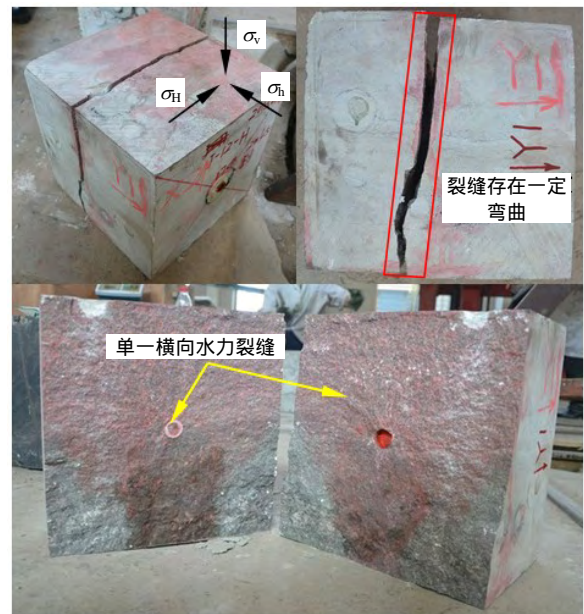


图 6 试样 J-12 水力裂缝形态

Fig.6 Geometry of hydro-fractures for specimen J-12

AE 计数指超过门槛信号的振荡次数，本文中利用各通道累加得到的 AE 计数对声发射活动性进行评价。如图 7 所示，在注入流体初期，AE 计数很少，试样达到破裂压力的瞬间，AE 计数骤增，呈现出一种突发性的态势，水力裂缝扩展完成后，AE 计数又趋于平静。AE 计数的活动性与水力裂缝的起裂扩展有很好的对应关系。压裂过程中监测到的事件点集中在与井筒垂直的一个狭窄的区域内，

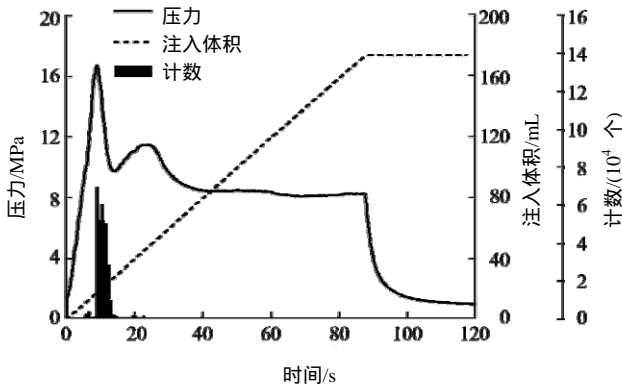


图 7 试样 J-12 泵压、注入体积和声发射计数曲线
Fig.7 Pressure, pumping volume and AE count curves for specimen J-12

这与剖开观察到的横向水力裂缝的位置有较好的一致性(见图 8)。

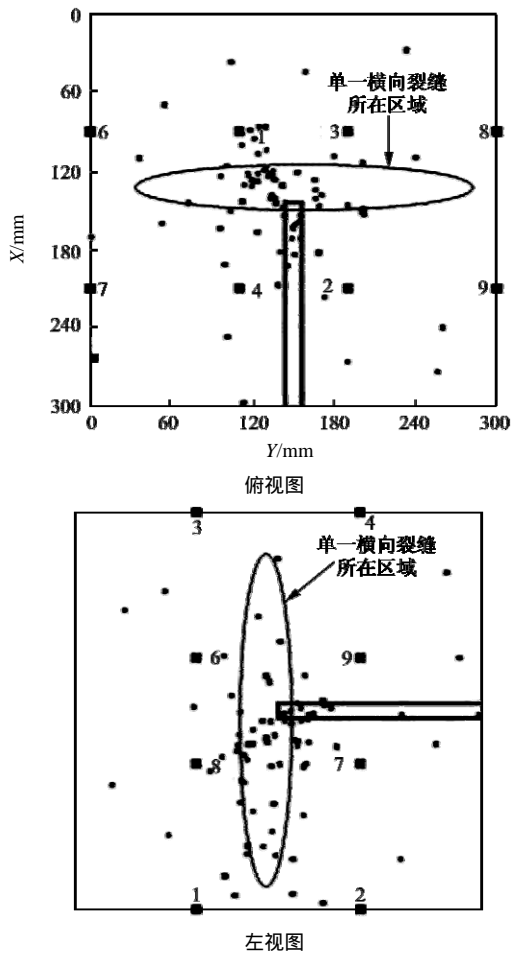
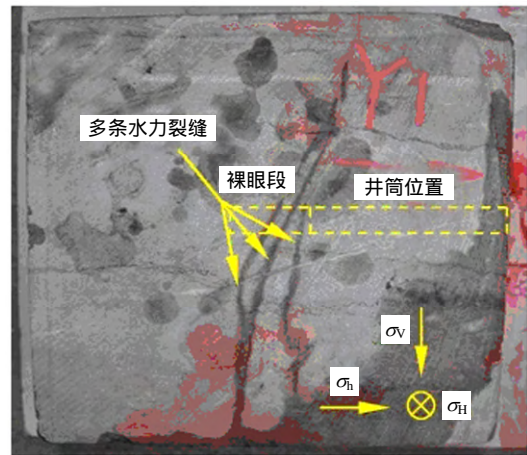


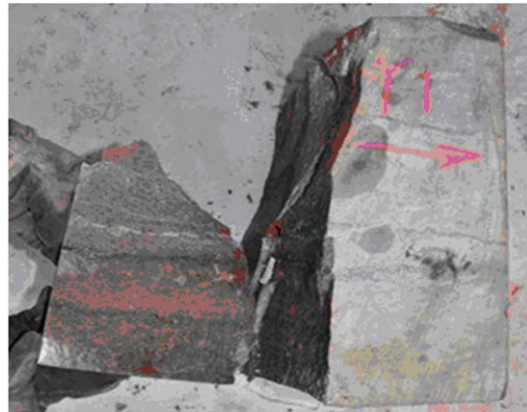
图 8 试样 J-12 声发射定位效果
Fig.8 AE locating results of specimen J-12

(2) 多条横向裂缝

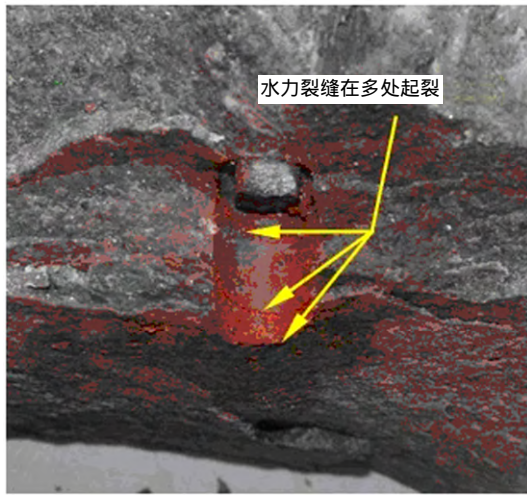
观察压裂后的试样 J-6 发现,其侧面密集分布有多条水力裂缝,且其均位于井筒的裸眼段范围(见图 9(a))。将试样剖切后,发现每个水力裂缝面均有



(a)



(b)



(c)

图 9 试样 J-6 水力裂缝形态

Fig.9 Geometry of hydro-fractures for specimen J-6

示踪剂分布(见图 9(b)),并观察到裸眼段井壁表面有多条横向裂缝(见图 9(c))。这说明裸眼段存在多条横向水力裂缝起裂扩展现象。同时,还可看出裂缝面并不完全与井筒垂直,而是存在一定的倾斜和弯曲。试验过程中记录的泵压-时间曲线也呈现出明显的特殊性,在 13.8 s 时,达到起裂压力 34.5 MPa,

随后压力曲线呈剧烈波动状态，且波动过程中的峰值在不断增大，最大时达到 52.0 MPa，165 s 后压力曲线趋向于平稳，此时的压力约为 41.6 MPa。而压力曲线在初期的剧烈波动上升表明这多条横向裂缝并不是同时起裂的，而是在压裂的过程中依次起裂的，且每条裂缝均沿其独有的扩展路径延伸，直至形成贯通试样表面的多条水力裂缝通道。

如图 10 所示，AE 计数也随泵压曲线的波动呈现出有规律的起伏。在泵压曲线的各个峰值点附近，AE 计数都有较高的数值，随后趋于平静，但 AE 计数总体呈现出递减的趋势，表明井壁初始破裂时伴随的声发射活动是最强烈的，随后裂缝的扩展以及二次起裂相应的声发射活动会逐渐减弱。声发射定位到的事件点子主要集中在一个有一定宽度的带状区域内，这也印证了所形成的多条横向水力裂缝的试验结果(见图 11)。

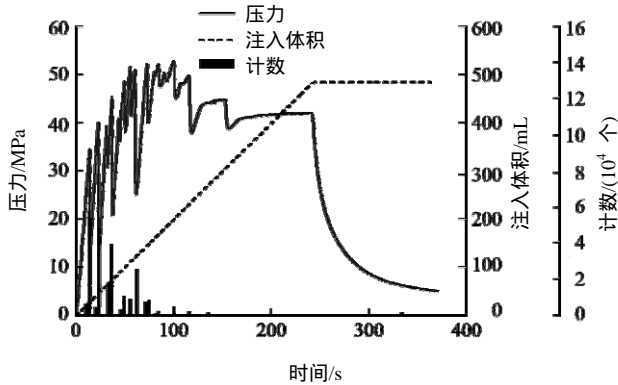
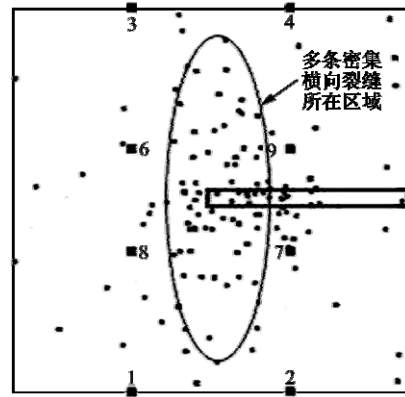
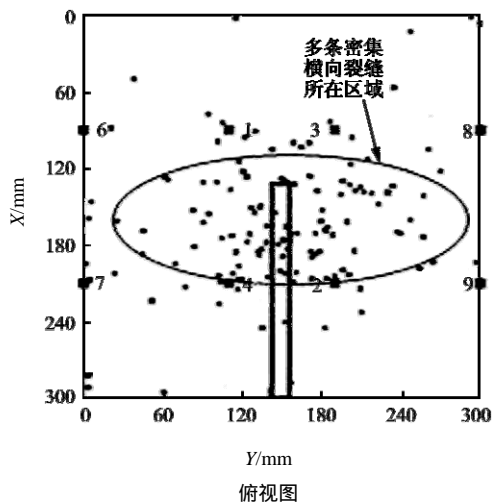


图 10 试样 J-6 泵压、注入体积和声发射计数曲线
Fig.10 Pressure, pumping volume and AE count curves for specimen J-6

(3) 纵横交叉裂缝

试样 J-5 存在 2 种裂缝形态——纵向裂缝和横向裂缝。纵向裂缝沿着井筒轴线方向，起裂位置位

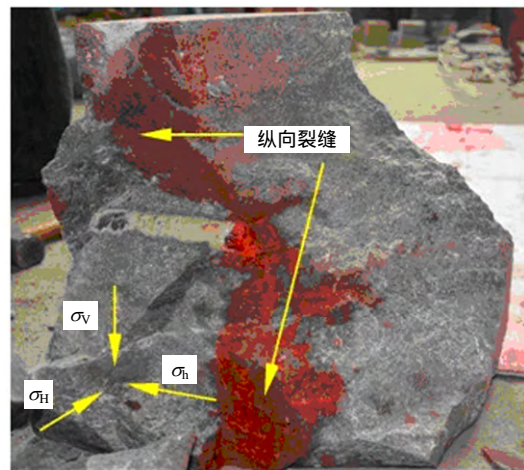


左视图

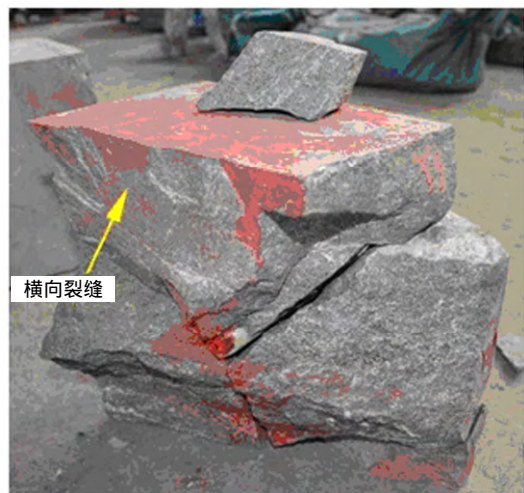
图 11 试样 J-6 声发射定位效果

Fig.11 AE locating results of specimen J-6

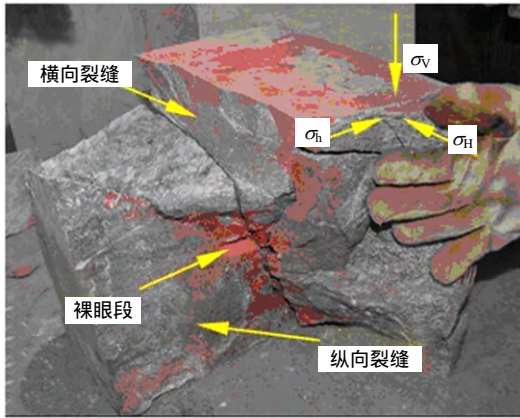
于井筒的最高点和最低点，裂缝面与水平最大主应力垂直，详见图 12(a)和(c)。横向裂缝与井眼轴线垂直。史明义等^[5]利用水泥块试样进行的水平井水力压裂试验也观察到了纵横交叉裂缝这一试验现象。



(a)



(b)



(c)

图 12 试样 J-5 水力裂缝形态

Fig.12 Geometry of hydro-fractures for specimen J-5

泵压曲线在初始阶段急剧升高，起裂压力为 28.7 MPa，随后压力跌落到 25.7 MPa，跌幅 3 MPa，压力再次升高到 33.6 MPa，涨幅 7.9 MPa，之后压力曲线呈现出小幅度波动状态。

AE 计数随时间的变化显示出很好的规律性，初始破裂时产生的 AE 计数最高，之后随压力曲线的波动而有规律地变化(见图 13)。声发射监测到的事件点集中在相互垂直的 2 个带状区域，分别对应形成的横向和纵向水力裂缝的区域，具体见图 14。这表明通过定位获取的声发射源的位置和水力裂缝的分布是一致的。

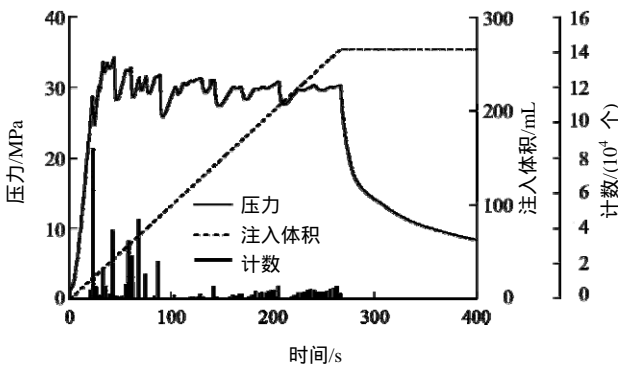


图 13 试样 J-5 泵压、注入体积和声发射计数曲线

Fig.13 Pressure, pumping volume and AE count curves for specimen J-5

3.2 水平井起裂模式总结

根据介壳灰岩水平井水力裂缝的裂缝形态和泵压曲线特征，将水力裂缝的破裂形态分为 I, II, III 三类(见表 3)。由表 3 可知，不同的水力裂缝破裂模式有不同的压力曲线与之对应，且不同类型的泵压曲线都有其自身显著的特征，因此，可以尝试利用泵压曲线的独有特征推测分析水力裂缝的起裂与延伸形态^[13]。

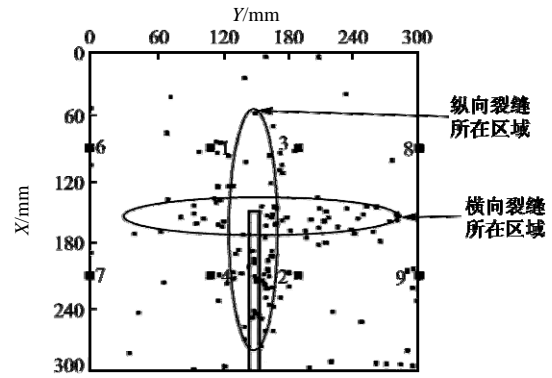


图 14 试样 J-5 声发射定位效果

Fig.14 AE locating results of specimen J-5

3.3 水平井水力裂缝起裂模式分析

当水平井的井轴线沿着水平最小主应力方向时，水力裂缝在井壁处的起裂存在 2 种基本类型，第一种为沿井筒轴线方向起裂，形成纵向裂缝，第二种为沿井筒环向起裂，形成横向裂缝，具体见图 15。

将岩体视为线弹性、各向同性、均匀介质，且水力裂缝在井壁处的起裂遵循最大拉应力准则，则沿井筒轴向起裂的破裂压力的计算公式^[14]为

$$p_b^1 = 3\sigma_H - \sigma_v - \sigma_t \tag{1}$$

沿井筒环向起裂的破裂压力的计算公式^[15-16]为

$$p_b^2 = \frac{\sigma_h - \sigma_t}{0.94} \tag{2}$$

式(2)中压应力取正值，拉应力取负值，各参数取值如下： σ_t 为岩石的抗拉强度，取 -3.0 MPa； σ_v 为垂向主应力，取 20 MPa； σ_H 为水平最大主应力，取 18 MPa； σ_h 为水平最小主应力，取 14 MPa。

将参数代入式(1)，(2)可得： $p_b^1 = 37 \text{ MPa}$ ， $p_b^2 = 18 \text{ MPa}$ 。

由此可知，水力裂缝更容易沿着井筒环向起裂，形成横向裂缝，试验中 3 种起裂模式都有横向裂缝产生也说明了这一点。

将实测初始起裂压力与计算得到的理论值进行对比，并考虑水力裂缝起裂模式，得到图 16。由图 16 可知，I 型起裂试样(形成单一横向裂缝)的初始破裂压力与理论值($p_b^2 = 18 \text{ MPa}$)较为接近，但比理论值要偏小，可能是由于岩石本身的非均质性，井筒壁面存在微小缺陷所致。II 型起裂试样的初始起裂压力较高，其值虽然接近产生纵向裂缝的破裂压力理论值($p_b^1 = 37 \text{ MPa}$)，但是起裂形成的水力裂缝却是密集的多条横向裂缝，其原因可能是水力裂缝在井壁的多个缺陷处起裂，多条裂缝的竞争扩展导致了压力曲线的剧烈波动。III 型起裂试样的初始

表 3 水力裂缝起裂模式分类

Table 3 Classification of the fracture initiation modes

起裂模式	特征描述	符合试样	裂缝形态	典型压力曲线
I	单一横向裂缝：只形成一条横向裂缝；破裂压力相对较低，破裂后压力有较大跌落，后趋于平稳	J-2, J-3, J-9, J-12		
II	多条横向裂缝：初始破裂压力较高，之后压力剧烈波动且持续升高，最后趋于平稳	J-6, J-10, J-13		
III	纵横交叉裂缝：初始破裂压力较高，之后压力在高水平小范围内波动，无明显跌落	J-4, J-5		

注：J-7, J-8, J-11 试样由于封口处漏水，试验失败。

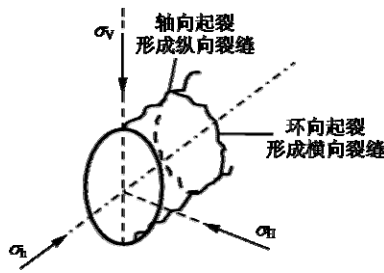


图 15 井壁处的水力裂缝起裂类型

Fig.15 Hydro-fracture Initiation types around the borehole

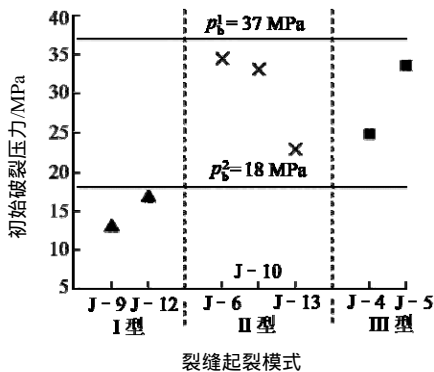


图 16 实测初始起裂压力与理论值的对比

Fig.16 Comparison of breakdown pressure from test and theory

起裂压力也较高，最终形成纵横交叉的裂缝。总体来看，试样的初始破裂压力分布比较离散，即便在相同的起裂类型下，初始破裂压力也比较离散，这可能是由岩石的非均质性造成的。

4 讨论

(1) 排量对水平井起裂模式的影响

如图 17 所示，在排量相同的条件下，初始起裂压力有较大的离散性。初始起裂压力与排量没有明显的相关关系。2 个 I 型起裂模式试样对应的排量均为 2.0 mL/s，大多数 II, III 型起裂模式试样对应的排量较低(0.5, 1.0 mL/s)。这说明在较高的排量下，水平井更容易形成单一横向裂缝，而在低排量下水力裂缝的起裂形态可能更趋向于复杂，排量是影响水平井起裂模式的一个关键因素。

(2) 裂缝形态对泵压曲线的影响

不同的裂缝起裂延伸模式会导致特定的压力响应曲线，由本试验可知，与单一水力裂缝相比，复杂的裂缝形态可导致压力曲线的较大波动，而且在多裂缝的延伸过程中压力维持在较高水平。J. L. Brumley 和 H. H. Abass^[17]认为，压力反弹现象(泵压曲线的波动)表明流体注入速度大于裂缝延伸接受液体的速度。单一裂缝延伸过程中，压力曲线没有出现反弹现象，说明裂缝扩展形成的新体积足够接受流体的注入，而多条裂缝延伸的过程中，存在明显的压力反弹现象，说明多裂缝延伸时形成的新体积要小于单一裂缝的体积，且不足以充分接受流体的注入。多裂缝的延伸存在相互竞争，相互抑制。

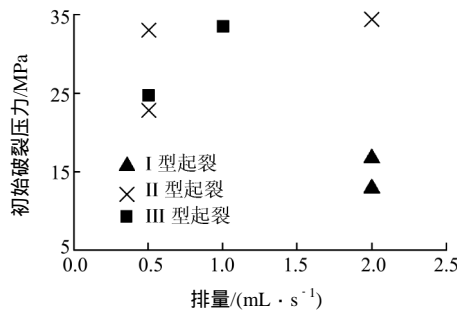


图 17 初始起裂压力与排量的关系

Fig.17 Relationship between breakdown pressure and pumping rate

5 结论与建议

(1) 试验中观察到的水平井水力裂缝的起裂模式可分为 3 类——单一横向裂缝，多条横向裂缝和纵横交叉裂缝，表明了水平井近井裂缝起裂延伸的复杂性。

(2) 不同的水力裂缝起裂模式对应不同的泵压曲线，现场可以尝试根据泵压曲线的特征推测水力裂缝的起裂扩展情况，并与微震监测的数据进行对比分析。

(3) 试样中水力裂缝的起裂模式具有随机性，且初始破裂压力存在很大的离散性，这可能是由裂缝的破裂模式和岩石的非均质性共同导致的。这也间接反映出现场井下压裂的复杂性，可能同时存在多种压裂效果。

(4) 低排量下水力裂缝的起裂形态可能更趋向于复杂，排量是影响水平井起裂模式的一个关键因素。

(5) 突发的高 AE 计数往往对应着裂缝的初始起裂或者已有裂缝的再次起裂。声发射监测可以较好地记录裂缝的起裂扩展过程。

(6) 声发射定位到的事件点子主要集中在形成的水力裂缝附近，可通过监测定位结果初步判断水力裂缝的位置。

(7) 对于介壳灰岩储层的水平井水力压裂，可能会在井壁附近产生密集横向裂缝，导致高泵压、高摩阻损失和早期砂堵。应做好压裂过程中的实时监测分析，并根据异常情况及时调整压裂参数。

参考文献(References) :

[1] RABAA W E. Experimental study of hydraulic fracture geometry initiated from horizontal wells[R]. SPE 17920, 1989.
 [2] ABASS H H, SAEED H, MEADOWS D L. Nonplanar fracture propagation from a horizontal wellbore : experimental study[J]. SPE Production and Facilities, 1996, 11(3) : 133 - 137.
 [3] 刘建忠,刘翔鹤,孙聚晨. 水平井水力压裂真三维物理模拟试验[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6) :69 - 76.(LIU Jianzhong ,LIU Xiange ,SUN Juchen. A true three-dimensional physical modeling of hydraulic fracturing in horizontal well[J]. Petroleum Exploration and Development , 1993, 20(6) : 69 - 76.(in Chinese))
 [4] 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, 2000, 19(增) :868 - 872.(CHEN Mian ,PANG Fei , JIN Yan. Experimental and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.) : 868 - 872.(in Chinese))
 [5] 史明义, 金 衍, 陈 勉, 等. 水平井水力裂缝延伸物理模拟试验研究[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(3) : 130 - 133.(SHI Mingyi , JIN Yan , CHEN Mian , et al. Physical simulation test on hydraulic fracture expansion in horizontal wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(3) : 130 - 133.(in Chinese))
 [6] 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) : 944 - 950. (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) : 944 - 950.(in Chinese))
 [7] 赵兴东, 李元辉, 刘建坡, 等. 基于声发射及其定位技术的岩石破裂过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5) : 990 - 995. (ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, LIU Jianpo, et al. Study on rock failure process based on acoustic emission and its location technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5) : 990 - 995.(in Chinese))
 [8] 许 江, 李树春, 唐晓军, 等. 单轴压缩下岩石声发射定位实验的影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4) : 765 - 772. (XU Jiang, LI Shuchun, TANG Xiaojun, et al. Influential factors of acoustic emission location experiment of rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4) : 765 - 772.(in Chinese))
 [9] 刘建坡, 王洪勇, 杨宇江, 等. 不同岩石声发射定位算法及其实验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(8) : 1 193 - 1 196. (LIU Jianpo, WANG Hongyong, YANG Yujiang, et al. Experimental Study on Different Rock Locating Algorithms with Acoustic Emission[J]. Journal of Northeastern University : Natural Science , 2009, 30(8) : 1 193 - 1 196.(in Chinese))
 [10] 刘培洵, 刘力强, 黄元敏, 等. 声发射定位的稳健算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1) : 2 760 - 2 764.(LIU Peixun, LIU Liqiang, HUANG Yuanmin, et al. Robust arithmetic for acoustic emission location[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1) : 2 760 - 2 764.(in Chinese))
 [11] 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 Yintong, YANG Chunhe, JIA Changgui, 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.(in Chinese))
 [12] 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) : 1 243 - 1 251.(HENG Shuai, YANG Chunhe, ZENG Yijin, et al. Experimental study on the hydraulic fracture geometry of shale[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7) : 1 243 - 1 251.(in Chinese))
 [13] NOTLE K G, SMITH M B. Interpretation of fracturing pressures[J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33(9) : 1 767 - 1 775.
 [14] YE W C H. Mechanics of hydraulic fracturing[M]. Houston : Gulf Publishing Company, 1997 : 1 - 90.
 [15] 黄荣樾. 水力压裂裂缝的起裂和扩展[J]. 石油勘探与开发, 1981, (5) : 62 - 74.(HUANG Rongzun. Initiation and propagation of hydraulic fracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 1981, (5) : 62 - 74.(in Chinese))
 [16] HAIMSON B, FAIRHURST C. Hydraulic fracturing in porous-permeable materials[J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(7) : 877 - 817.
 [17] BRUMLEY J L ,ABASS H H. Hydraulic fracturing of deviated wells : Interpretation of breakdown and initial fracture opening pressure[R]. SPE 37363, 1996.