

页岩水力压裂水力裂缝与层理面扩展规律研究

李 芷¹, 贾长贵², 杨春和^{1,3}, 曾义金², 郭印同¹, 衡 帅¹, 王 磊¹, 侯振坤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. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100101; 3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:在对含天然层理弱面页岩进行水力压裂过程中, 水力主裂缝的起裂、扩展及层理面的扩展对缝网的形成有重要影响。为研究水力主裂缝的起裂、扩展规律和层理面对水力裂缝扩展的影响, 开展真三轴试验条件下的水力压裂试验, 采用声发射系统监测水力压裂过程, 并在试验后对试样进行剖切与 CT 扫描; 同时进行定量的理论分析, 并通过试验结果验证。研究表明: (1) 起裂方向由初始角度转至最大水平主应力方向; 垂向应力与水平最大主应力相差极小时, 各个方向起裂压力相差极小, 裂缝很快转向最大水平主应力方向。(2) 水力主裂缝整个扩展过程中所需水压区间与裂缝长度、断裂韧性值相关。(3) 形成由层理面与主裂缝构成的网状的裂缝系, 层理面在主裂缝的靠近过程中张开区的长度极小, 主要在主裂缝接触到层理面后产生较大的张开区与剪切区, 层理面的剪切区域长度远大于张开区长度, 剪切区域提供主要的导流通道; 剪切区的长度对层理面黏聚力 c 和水力裂缝与层理面交角 β 参数敏感性很高。研究结果可以为压裂模型的建立提供几何参数, 并对施工参数的设计有指导意义。

关键词: 岩石力学; 页岩水力压裂; 水力主裂缝; 层理面; 起裂与扩展规律; 张开区长度; 剪切区长度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)01-0012-09

PROPAGATION OF HYDRAULIC FISSURES AND BEDDING PLANES IN HYDRAULIC FRACTURING OF SHALE

LI Zhi¹, JIA Changgui², YANG Chunhe^{1,3}, ZENG Yijin², GUO Yintong¹, HENG Shuai¹,
WANG Lei¹, HOU Zhenkun³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to investigate the interaction of the hydraulic fractures and the bedding planes of shale in hydraulic fracturing, the hydraulic fracturing experiments under triaxial conditions were carried out with the acoustic emission system monitoring the process of hydraulic fracturing and the CT scanning system scanning the sections of rock samples before and after hydraulic fracturing for capturing the distribution of fractures. The initiation and propagation of the hydraulic fracture was captured experimentally. At the situation of small difference of stresses, the critical pressure for initiation was found to be differed little in different angels, the fracture grew along the direction of σ_H after initiation. The critical pressure for the propagation of major hydraulic fractures was related to the length of fracture and K_{IC} . The small sections of the bedding planes in shale

收稿日期: 2014-01-17; **修回日期:** 2014-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104144); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226701); 中石化科技部页岩气水平井分段压裂地应力变化规律研究(P12129)

作者简介: 李 芷(1991-), 女, 2012年毕业于中国地质大学(武汉)勘查技术与工程(油气井)专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石力学在石油工程中的应用方面的研究工作。E-mail: taigelneluda@sina.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.01.002

were opened up when the major hydraulic fracture approached. The passage was created at the intersection of the hydraulic fracture and the bedding plane due to shearing tension. The shear zone was larger than opened one, with a ratio of 13 at maximum, functioning as the major passage for fluid flow. The length of the shear zone is sensitive to the cohesion of bedding planes, and the angle of intersection of hydraulic fracture and bedding plane.

Key words :rock mechanics ;hydraulic fracturing in shale ;main hydraulic fracture ;bedding plane ;initiation and growth ; open zone length ; shear zone length

1 引 言

水力压裂技术是一种人工提高渗透率的方法,在低渗油气藏、非常规油气藏、地热开发、核废料储存等领域有重要的应用,有较高的工业价值与经济效益。在页岩气开发中,水力压裂技术是实现经济产能的关键技术手段^[1]。由于页岩储层的渗透率极低,油气的导出主要依靠人工改造的裂缝体系^[2]。页岩的层理面发育,因此在大型的多段水力压裂中,层理面会由于水力主裂缝产生的附加应力而产生张开或滑移,并且可能干扰主裂缝的走向与路径,出现转折等,因而形成复杂的裂缝网。传统的压裂中,常用的二维或三维模型无法描述层理面所提供的导流通道信息,而在极低渗透率的页岩中,层理面提供了距水力主裂缝较远的油气的重要运输路径,在整个缝网的运输效率中起到了非常关键的作用。因此研究层理面在水力压裂过程中可提供的导流通道的长度与性质至关重要。

传统的压裂模型中,二维模型有经典的 PKN、硬币模型、平面应变模型等,三维的 pseudo-3D 模型等,但这些模型都是只考虑水力主裂缝形态,而页岩气开发中一般使用水平井多段压裂、同步压裂等措施,以使页岩储层形成复杂的缝网,因此需要建立新的压裂数学模型,指导施工参数的设计。本文对层理面在水力裂缝影响下扩展机制的研究,对模型参数与施工参数的选择设计可提供参考。

C. M. Freem 等^[3]建立了页岩储层中多段压裂下的产率-压力模型,并且在模型中考虑了层理面所引起的储层渗透率的变化,但并未考虑几何尺寸;J. Zhou 等^[4]通过真三轴条件下的水力压裂试验,得出了低水平应力差使天然裂缝易剪切破坏,天然裂缝的极限容量与逼近角有关的结论,但是并未提供可以对模型或施工设计可用的参数;H. F. Zhao 等^[5]通过试验得出,导流能力随剪切位移的增大而增大,剪切位移到达一定值后,导流能力则不再上升,并且得出了需要维持裂缝分支转向的最小泵入速率;J. T.

Shakib^[6]用扩展有限元法 XFEM 计算,得出了水力压裂的缝网的复杂程度与差应力的大小有关,扩展的水力裂缝可以在平行的一系列裂缝系上产生拉应力与剪应力,并且应力可能达到使它们产生张拉与剪切;D. A. Chuprakov 和 A. S. Zhubayev^[7]使用变分法,根据最小应变能密度判定标准,计算得出了在较小的摩擦因数下,天然裂缝的剪应力集中区可能会产生张应力,形成新的裂缝。

本文对水力主裂缝的起裂扩展机制进行了定量的分析;对层理面的扩展规律进行了分析,层理面在水力压裂中之所以会提供导流通道,主要是由于在主水力裂缝的裂尖应力场干扰下,层理面会出现张开区与剪切区。对层理面的导流通道长度与性质进行了分析,并对剪切区与张开区对层理面力学性质与交角、水压的敏感性进行了分析,可以为模型与施工参数的选择、设计提供参考。

2 试验条件及方法

2.1 试验样品性质

试样取自南方页岩气开发示范区块龙马溪组露头页岩,页岩基本物理力学参数如表 1, 2 所示,石英含量 53.41%,黏土矿物相对较少,其余组分主要为钠长石、钾长石、方解石、黄铁矿。

表 1 页岩基质力学参数

Table 1 Mechanical parameters of shale used in experiment

单轴抗压强度/ MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	抗拉强度 σ_t /MPa	断裂韧性 K_{IC} / (MPa · m ^{1/2})
118.00	14.06	0.367	11.67	1.20

表 2 页岩层理面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of shale bedding planes

层理面抗拉强度/MPa	层理面黏聚力 c /MPa	层理面摩擦角 ϕ (°)
0.20 ~ 2.00	8.98	33.86

2.2 试验内容

进行了真三轴试验条件下的水力压裂试验，用声发射信号监测裂缝扩展演化过程，同时压裂液伺服系统记录页岩水力压裂过程中的泵压数据，在试验前与试验后对试验试样进行 CT 扫描，以对裂缝形态进行精细描述。

页岩水力压裂物理模拟设定垂向应力垂直于层理面，采用外径 24 mm 金刚石钻头钻 170 mm 预制井眼。模拟套管采用外径 20 mm、内径 15 mm 高强度钢管，在深 135 ~ 165 mm 位置，对称切割 1.5 mm 宽水力通道，底端焊接封闭，上端内置螺纹与水力压裂泵管线密封连接，套管割缝位置采用棉纱充填，采用高强度黏结剂将套管与预制井眼封固，设定套管割缝位置与最大水平应力夹角为 45°。泵入清水进行压裂试验，加入红色示踪剂以便于试样剖切后对水力裂缝的辨认。表 3 列出了试验中井筒及割缝的几何参数及试验过程中的主应力值。图 1 为水平井真三轴水力压裂图。

表 3 试样及井筒，割缝几何参数及主应力

Table 3 Geometric parameters of shale sample, well and slot and principal stresses

试样边长/mm	井筒长/mm	井筒割缝缝长/mm	井筒割缝缝宽/mm	垂向应力 σ_v /MPa	最大水平主应力 σ_H /MPa	最小水平主应力 σ_h /MPa
300	170	30	1.5	20	19.51	16.98

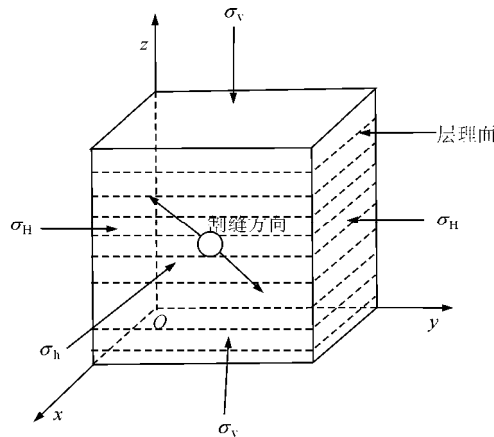


图 1 水平井真三轴页岩水力压裂

Fig.1 Hydraulic fracturing of shale in horizontal well under real triaxial condition

3 主裂缝起裂与扩展分析

3.1 主裂缝起裂分析

在页岩的真三轴水力压裂试验中，割缝与垂向应力的夹角方向为 45°；取图 1 中所示 y 方向正向为

坐标系正向，则与最大水平主应力的夹角方向为 135°。在试验后试样的剖切图中，起裂方向近 45°；后转到最大水平主应力方向，如图 2 所示。图 2 为由图 1 中试样的背面向 x 轴正方向视图。



图 2 起裂方向及转向图

Fig.2 Direction of initiation and reorientation of the major fracture

将三向地应力转换到圆柱薄壁的井筒的极坐标上，根据水平井井壁上任意一点的应力公式^[8]：

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_r &= p_w \\
 \sigma_\theta &= \sigma_H \cos^2 \varphi + \sigma_h \sin^2 \varphi + \sigma_v - 2(\sigma_v - \sigma_H \cos^2 \varphi - \sigma_h \sin^2 \varphi) \cos(2\theta) - p_w \\
 \sigma_c &= \sigma_H \sin^2 \varphi + \sigma_h \cos^2 \varphi - 2\nu(\sigma_v - \sigma_H \cos^2 \varphi - \sigma_h \sin^2 \varphi - \sigma_H) \cos(2\theta) \\
 \tau_{r\theta} &= 0 \\
 \tau_{\theta c} &= 2(\sigma_h - \sigma_H) \cos \varphi \sin \varphi \cos \theta \\
 \tau_{cr} &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： p_w 为水压值； φ 为井筒轴线与最小主应力 σ_h 的交角； θ 为在垂直于井筒轴线的平面上，井壁上的任意一点与井筒轴线的连线与最大主应力方向 σ_H 的夹角； σ_r 为沿半径方向的正应力； σ_θ 为沿切线方向的正应力； σ_c 为沿井筒轴线方向的正应力； $\tau_{r\theta}$ ， $\tau_{\theta c}$ ， τ_{cr} 为不同平面内的应力。

图 3 为垂直于井筒轴线方向平面上的应力及起裂方向分析图。由于试验中井筒方向与 σ_h 方向一

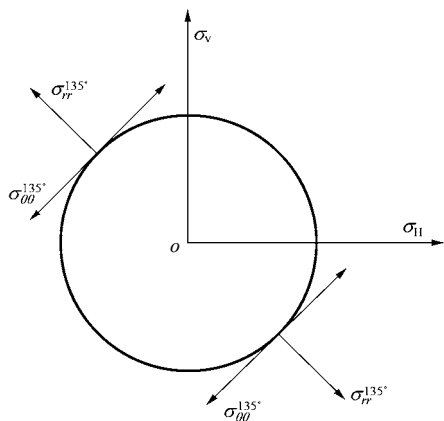


图 3 垂直于井筒轴线方向平面上起裂方向

Fig.3 Direction of initiation of major fracture on plane perpendicular to centerline of well

致, 则 $\varphi = 0^\circ$, 由于割缝方向为 45° , 则将 $\theta = 135^\circ, 315^\circ$ 代入式(1), 可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= p_w \\ \sigma_\theta &= \sigma_H + \sigma_v - p_w \\ \sigma_\varphi &= \sigma_h \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据式(2)可得, $p_w = \sigma_H + \sigma_v - \sigma_\theta$ 。

假设破裂时达到试样的抗拉强度 σ_t , 即满足下式:

$$\sigma_\theta = \sigma_t \quad (3)$$

根据表 3 可得, 试验中页岩水力压裂试验中的三向加载应力为 $\sigma_v = 20 \text{ MPa}$, $\sigma_H = 19.51 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 16.98 \text{ MPa}$ 。根据表 1, 试验试样页岩的基质的抗拉强度为 $\sigma_t = 11.67 \text{ MPa}$; 则可得破裂时的水压 p_w 的临界值为 $\sigma_H + \sigma_v - \sigma_t = 27.84 \text{ MPa}$ 。

在裸眼井中, 水会沿最小拉应力方向(即最大主应力方向)进入, 将 $\theta = 0$ 代入式(1), 计算临界水压值可得 $p_w = -\sigma_v + 3\sigma_H - \sigma_t = 26.5 \text{ MPa}$ 。

在定向射孔井中, 即 θ 取不同值, 当 θ 不同时, 本试验条件下起裂所需的水压差别极小, 这是因为垂向应力与最大水平主应力的差值极小, 只有 0.49 MPa , ($\sigma_v - \sigma_H$) ≈ 0 , 这说明了水力主裂缝很快可以转向最大水平主应力方向。

3.2 主裂缝扩展分析

压裂试验后, 对试验后试样的剖切显示, 水力主裂缝沿最大水平主应力方向 σ_H 扩展, 如图 4 所示。

将水力裂缝扩展作为含 I 型裂缝的平面裂缝问题(见图 5), 则根据 Irwin 的断裂韧性判据^[9]有

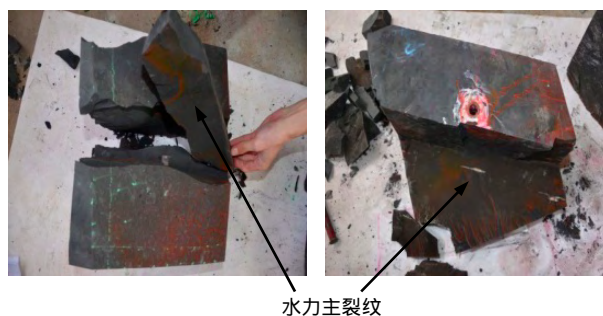


图 4 试验后试样剖切水力主裂缝

Fig.4 Major hydraulic fracture in shale after experiment

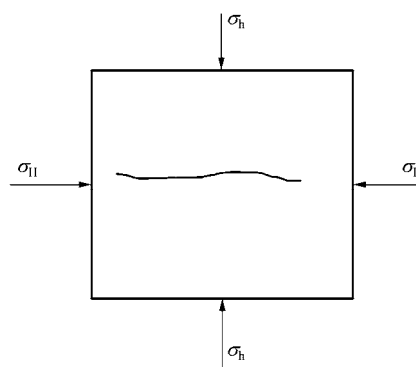


图 5 含 I 型裂缝的两向受压平面裂缝问题

Fig.5 Propagation of major hydraulic fracture based on the condition of plane strain

$$K_I = K_{IC} \quad (4)$$

两向受压平面内裂缝面上作用有均布载荷 p_w , 应力强度因子^[10-11]为

$$K_I = (p_w - \sigma_h)\sqrt{\pi a} \quad (5)$$

根据表 1, 试验测得试样的断裂韧性为 $K_{IC} = 1.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

将测得试样的断裂韧性值与最小水平主应力值代入, 可得 $p_w = 1.2/\sqrt{\pi a} + \sigma_h$, 可以看出, 随着裂缝长度 a 的增大, 只需较小的水压值即可维持裂缝扩展, 图 6 为 p_w 与 a 的关系。

由图 6 可知, 需要维持整个试样尺度主裂缝扩展过程的水压值为 $18 \sim 26 \text{ MPa}$, 由声发射能量与泵压曲线(见图 7)可以看出, 在泵压曲线的最高点的下降曲线段内, 能量曲线出现几个峰值, 并在此后稳定在较小值, 说明起裂后裂缝的扩展发生在一个泵压区间内, 泵压值比理论预测值偏低, 但趋势一致。

图 8 为 AE 事件数与泵压曲线, 选取的时间段

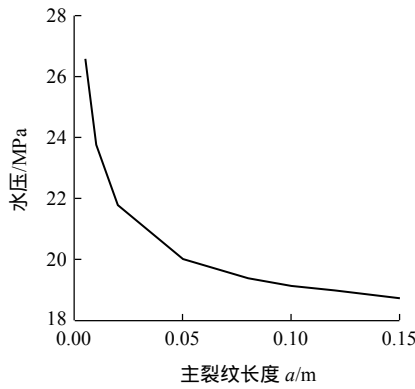


图 6 主裂纹扩展长度与水压关系

Fig.6 Relationship between pressure and propagation length of major hydraulic fracture

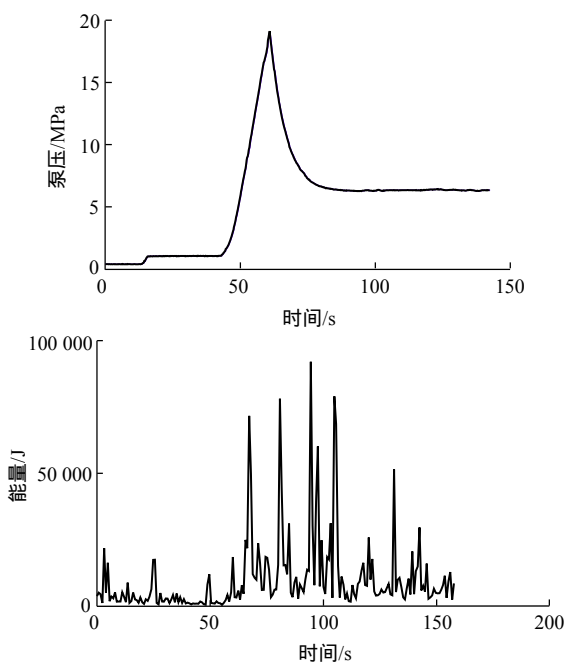


图 7 泵压曲线与声发射能量曲线

Fig.7 Curves of pumping pressure and AE energy

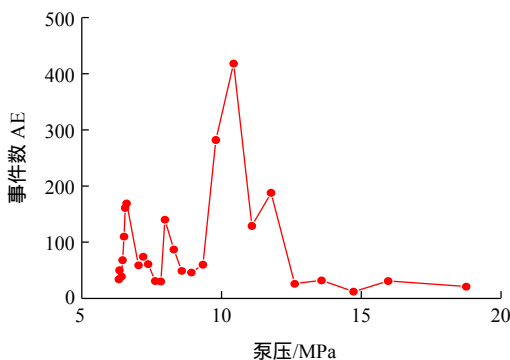


图 8 AE 事件数与泵压曲线

Fig.8 Curve of AE event vs. pumping pressure

为能量峰值与 AE 事件数峰值集中出现的时期。由图 8 可知，在泵压 10 MPa 左右，撞击数最高，说明在这个泵压下开始产生大量微裂缝。

4 层理面分析

$\sigma_{(v)i}$ 为层理面应力 σ_v 沿坐标轴方向的分量,由柯西应力公式可得,由远场三轴应力在层理面上引起的应力为

$$\sigma_{(v)j} = v_i \sigma_{ij} \tag{6}$$

式中： v_i 为层理面的法向量沿坐标轴的分量。试验中所用试样层理面为平行于水平面的层理面，法向量为(0, 0, 1)。

由远场应力引起的层理面上的正应力 σ_n^∞ 与剪应力 τ^∞ 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n^\infty &= \sigma_{ij} v_i v_j \\ \tau^\infty &= \sqrt{\sigma_v^2 - \sigma_n^2} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

将远场三轴应力与层理面法向量代入式(7)可知,在试验选取的三向应力条件下,层理面上的剪应力极小,为了计算简便,取剪应力值为 0,则层理面上正应力 $\sigma_n^\infty = -20$ MPa,剪应力 $\tau^\infty = 0$ 。

4.1 无水力裂缝

$\tau_n^\infty = 0$, 在垂向应力与最大水平主应力数值相差极小时,如果层理面的法向位于 σ_v 与 σ_H 构成的平面内,相当于处于静水压力下,剪应力几乎为 0,层理面被剪断的可能性较小。由此判断层理面的张开是由于水力裂缝对应力场的干扰作用。

4.2 水力裂缝距层理面的距离较小但未接触

图 9 为试验后水力裂缝穿过层理面的 CT 扫描图。首先对水力裂缝靠近层理面过程中层理面上的物理过程进行分析,示意图如图 10 所示。由于水力拉裂缝尖端的应力集中区较小,因此当水力裂缝与层理面距离极小时,层理面会受到裂尖诱导应力的影响。图 11 为水力裂缝裂尖距层理面距离极小时,层理面的受影响区域几何示意图。水力裂缝距层理面较近,水力裂缝尖点处距层理面距离为 d ,水力裂缝长度为 a' ,当 $d \ll a'$ 时,则层理面上一点的应力状态受到水力裂缝的应力场与远场应力的叠加作用^[10-11],水力裂缝的应力场 σ_{ij}^c 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx}^c &= (p_w - \sigma_h) \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\alpha}{2} \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{3\alpha}{2} \right) \\ \sigma_{yy}^c &= (p_w - \sigma_h) \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \alpha \left(1 + \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{3\alpha}{2} \right) \\ \tau_{xy}^c &= (p_w - \sigma_h) \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \cos \frac{3\alpha}{2} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

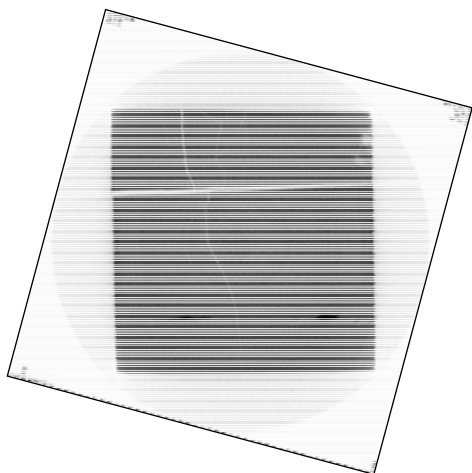


图 9 试验后水力主裂缝穿过层理面 CT 扫描图

Fig.9 CT scanning section of intersection of major hydraulic fracture and bedding plane

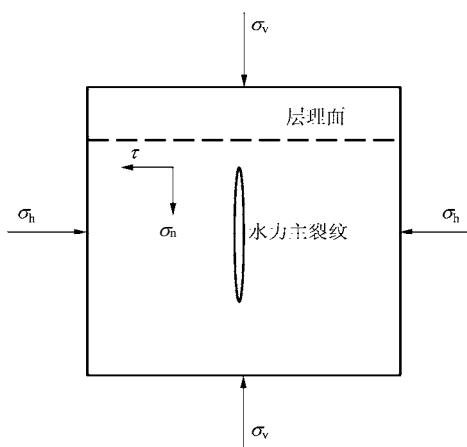


图 10 水力主裂缝接近层理面示意图

Fig.10 Sketch of major hydraulic fracture approaching bedding plane of shale

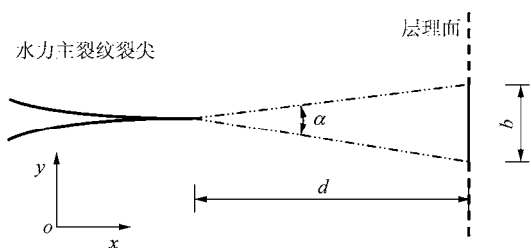


图 11 水力主裂缝裂尖距层理面距离极小时对层理面影响区域示意图

Fig.11 Sketch of possible influenced zone of bedding planes when major hydraulic fracture approached

式中： r 为层理面上一点距水力裂缝与层理面的交叉点的距离。

在这个阶段，层理面上受到的影响区域 b 非常小，水力主裂缝与层理面的距离 d 相对于层理面的

受影响区很大，即 $d \gg b$ ，则可认为 α 角接近于 $0^{[7]}$ ，将 $\alpha = 0, r = d$ 代入式(8)可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx}^c &= (p_w - \sigma_h) \sqrt{\frac{a}{2d}} \\ \sigma_{yy}^c &= (p_w - \sigma_h) \sqrt{\frac{a}{2d}} \\ \tau_{xy}^c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将上述坐标系转换到层理面斜面上，可得水力裂缝在层理面上引起的正应力 σ_n^c 与剪应力 τ^c 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n^c &= (p_w - \sigma_h) \sqrt{\frac{a}{2d}} \\ \tau^c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(10)为由于水力裂缝的靠近引起的层理面上的应力，引起的附加剪应力为 0，引起的附加拉应力与远场引起的压应力叠加后，层理面上总的正应力 σ_n 为

$$\sigma_n = \sigma_n^c + \sigma_n^\infty \quad (11)$$

计算中假定主裂缝扩展过程中水压做功全部用来转化为主裂缝的界面能，则主裂缝扩展时的应力强度因子为临界值断裂韧性，则 $(P_w - \sigma_h) \sqrt{a}$ 为定值。根据式(10)，裂缝在层理面上引起的正应力仅与 d 有关，由于远场三轴应力在层理面上引起的应力为定值，因此层理面上的正应力仅与水力主裂缝距层理面的距离 d 相关，如图 12 所示。

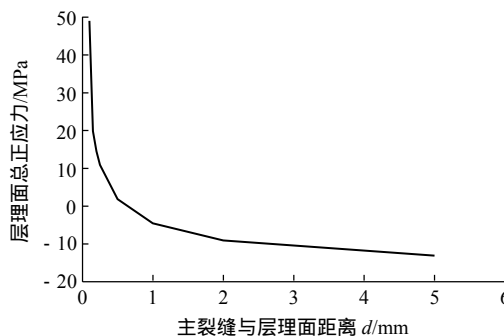


图 12 层理面总的正应力随主裂缝与层理面的距离变化曲线

Fig.12 Curve of total stress on bedding plane vs. distance between major hydraulic fracture and bedding plane

由图 12 可以看出，在距离 $d = 0.5$ mm 时，层理面上会产生拉应力，且随着距离的减小上升极快。当 $\sigma_n > \sigma_t^s$ ，即正应力大于层理面抗拉强度时，层理面有区域裂开。在水力裂缝靠近层理面的过程中，层理面可张开区域极小。在 $b \ll d \ll a'$ 条件下随着距离的增大， $\sigma_n \rightarrow \sigma_n^\infty$ 。

4.3 水力裂缝接触到层理面

图 13(a)为原 CT 扫描图，图 13(b)为经过处理提取出的裂缝 CT 图。由图 13 可以看出，水力裂缝与层理面一起构成复杂的缝网，水力裂缝的张开宽度较层理面的宽度大，层理面与水力裂缝交叉部分的宽度较大。

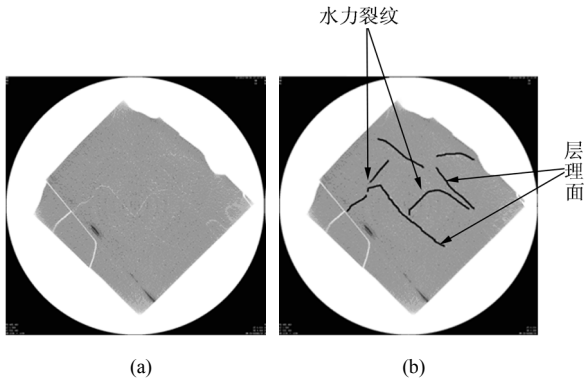


图 13 页岩水力压裂试验后 CT 扫描缝网图

Fig.13 CT scanned fractures of shale after experiment of hydraulic fracturing

根据 D. A. Chuprakov 和 A. S. Zhubayev^[7]的研究，当水力裂缝接触到层理面时，层理面并非对称张开，而是有一个倾向的方向，如图 14 所示，其中 β 为水力主裂缝与层理面的交角。

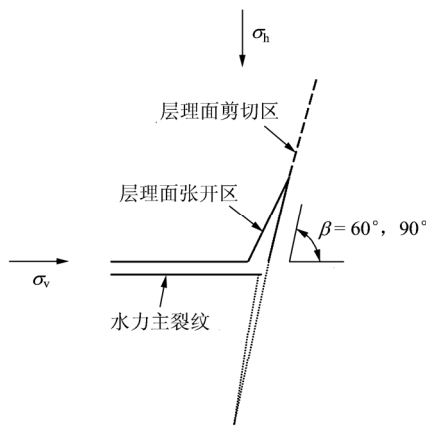


图 14 水力裂缝接触到层理面分析示意图

Fig.14 Sketch of coalescence of hydraulic fracture and bedding plane

由于试验中试样边长为 300 mm，应取裂缝尖端应力场的前两项^[7, 10-11]，将裂缝尖端应力场转化到极坐标系中，有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr}^c &= p_w \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\beta}{2} \left(1 + \sin^2 \frac{\beta}{2} \right) - p_w \\ \sigma_{\theta\theta}^c &= p_w \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos^3 \frac{\beta}{2} - p_w \\ \sigma_{r\theta}^c &= p_w \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\beta}{2} \cos^2 \frac{\beta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

转化为层理面上的正应力与剪应力：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n^c &= p_w \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos^3 \frac{\beta}{2} - p_w \\ \tau^c &= p_w \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\beta}{2} \cos^2 \frac{\beta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

层理面上的总的应力为水力裂缝引起的应力场与远场应力的叠加：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_n^\infty + \sigma_n^c \\ \tau &= \tau^\infty + \tau^c \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

根据表 3，层理面抗拉强度为 0.2 ~ 2.0 MPa，在计算中，可认为抗拉强度为 0，即 $\sigma_n > 0$ 时，层理面张开；剪应力大于层理面黏聚力 c 时，即可产生导流通道。由此可以得到层理面张开区与剪切区的判定标准，张开区为 $\sigma_n > 0$ ，剪切区为 $\tau > c$ 。

定义量纲一化的张开区长度为张开区的实际长度 r_n 与水力主裂缝半长 a 的比值 r_n/a ，定义量纲一化的剪切区长度为剪切区的实际长度 r_τ 与水力主裂缝半长 a 的比值 r_τ/a 。

由于远场应力在层理面上引起的应力是一定的，由式(12)可以得出，量纲一化的张开区或剪切区长度 r/a 的变化与水压 p_w 及水力主裂缝与层理面的交角 β 有关。由于在判别标准中剪切区为 $\tau > c$ ，因此量纲一化的剪切区长度还与层理面的黏聚力 c 相关。

(1) r_n/a 及 r_τ/a 随交角 β 的变化

图 15 为 $c = 8.98$ MPa， $p_w = 20$ MPa 时，量纲一化的张开区及剪切区长度随水力主裂缝与层理面交角 β 变化曲线。由图 15 可以看出，在交角小于 20 时，张开区较大，说明此时层理面只张开，但是无法达到一个较大的长度；在交角为 20 ~ 70 时，剪切区长度随交角增大而变大，在 $\arcsin(\sqrt{3}/3)$ 处取得最大值，而张开区长度变小，说明剪切区提供主要的导流通道，张开区只提供很小一部分，这也是有利的，因为张开区在水力压裂停泵后一段时间可能会闭合，因此剪切区是相对稳定的导流通道。交角为 90 时，剪切区长度略有下降但幅度不大，而张开区长度则降到一个很低的值，在水平井压裂中，水力主裂缝为横断裂缝，在层理面为平行于水平面时，交角即为 90°；此时由于剪切区长度较大而张开区长度较小，会提供比较稳定的导流通道。

页岩有多条平行层理面，即角度相同的一系列层理面，如果交角为 60 ~ 90°；剪切区有较大的长度，提供主要的导流通道。

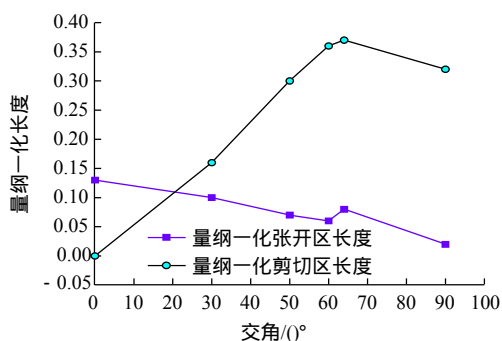


图 15 张开区及剪切区长度随交角变化曲线

Fig.15 Variation curves of length of opening/shear zone of bedding plane with intersection angle

(2) r_t/a 对层理面黏聚力 c 的敏感性

图 16 为 $p_w = 20 \text{ MPa}$, $\beta = 90^\circ$ 时剪切区长度随黏聚力 c 变化曲线。层理面黏聚力取值范围为 $2 \sim 16 \text{ MPa}$ 。分析可知, 剪切区长度 $r_t/a = 13/c^2$, 剪切区长度正比于 c^{-2} 。由图 16 可以看出, 黏聚力为 $2 \sim 5 \text{ MPa}$ 时, 剪切区长度对黏聚力的变化敏感性较大, 黏聚力为 $6 \sim 16 \text{ MPa}$ 时, 剪切区长度对黏聚力的变化敏感性相对减弱。黏聚力为 $4 \sim 10 \text{ MPa}$ 时, 剪切区长度对黏聚力变化的敏感性为 $0.05 \sim 0.15$ 。这一分析表明, 当黏聚力变化 1 MPa 时, 若现场水力压裂的水力裂缝半长为 100 m , 则剪切区长度变化 $5 \sim 15 \text{ m}$, 因此压裂区域的页岩力学性质变化可以引起导流区长度的较大变化。

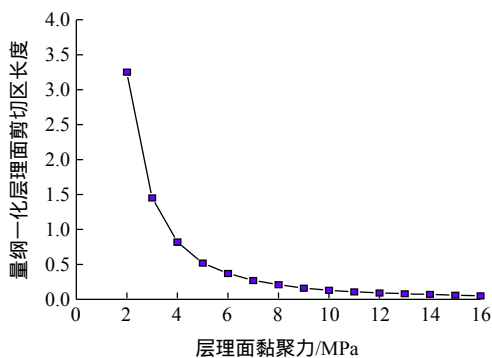


图 16 层理面剪切区长度随层理面黏聚力变化曲线

Fig.16 Change curve of length of shear zone of bedding planes with cohesion of bedding zone changing

(3) r_n/a 及 r_t/a 对 p_w 的敏感性

图 17 为 $c = 8.98 \text{ MPa}$, $\beta = 90^\circ$ 时, 量纲一化的张开区与剪切区长度随水压的变化曲线。层理面黏聚力取值见表 2。由图 17 可以看出, 量纲一化的张开区长度对水压变化的敏感性极小, 而量纲一化

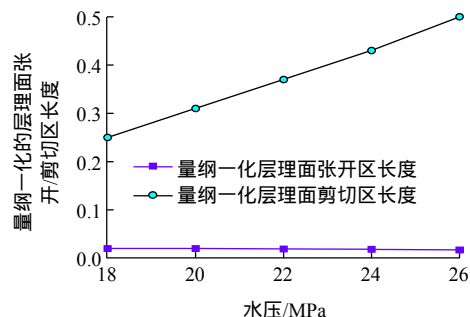


图 17 层理面张开区及剪切区长度随水压变化曲线

Fig.17 Variation of length of open/shear zone with pressure

的剪切区长度对水压变化的敏感性较大。量纲一化的剪切区长度远大于量纲一化的张开区长度, 由此可知剪切区为主要提供导流通道的区域。

5 结 论

(1) 在裂缝扩展的泵压区间内, 声发射的能量出现多个峰值, 并在其他区间保持在较低的能量。分析表明, 主裂缝整个扩展过程中所需水压区间与裂缝长度及断裂韧性值相关。

(2) 分析了层理面的扩展机制, 结果表明, 在主裂缝靠近层理面的过程中, 层理面的张开区长度非常小, 主要在主裂缝与层理面接触后出现张开区与剪切区。

(3) 剪切区相对于张开区长度要大很多, 剪切区提供主要的导流通道, 由于水力压裂中张开区在压裂完成后经过一段时间会闭合, 因此剪切区相对于张开区提供更稳定的导流通道。分析表明层理面是较好的提高渗透率的重要导流通道。

(4) 根据分析所得的量纲一化的张开区及剪切区长度, 可以确定压裂缝网模型中层理面的几何尺寸。

(5) 剪切区长度对于层理面黏聚力 c 很敏感, 因此压裂区域内页岩的力学性质的差异会造成剪切区长度较大的不同。

(6) 张开区与剪切区长度均与水压 p_w 有关, 剪切区长度对水压较敏感, 而张开区则敏感性极弱。因此可以先泵入高压以产生较大长度的剪切区, 由于张开区长度较为稳定, 因此后期压力下降后, 较小的张开区的闭合不会对层理面生成的导流通道产生较大的影响。

参考文献(References) :

- [1] 陈 勉, 庞 飞, 金 衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 868–872.(CHEN Mian, PANG Fei, JIN Yan. Simulation and analysis of real triaxial hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 868–872.(in Chinese))
- [2] 胡永全, 贾锁刚, 赵金州, 等. 缝网压裂控制条件研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(4): 126–132.(HU Yongquan, JIA Suogang, ZHAO Jinzhou, et al. Study on controlling conditions in network hydraulic fracturing[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology, 2013, 35(4): 126–132.(in Chinese))
- [3] FREEMAN C M, MORIDIS G, ILK D, et al. A numerical study of performance for tight gas and shale gas reservoir systems[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 108(8): 22–39.
- [4] ZHOU J, CHEN M, JIN Y, et al. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a triaxial fracturing system in naturally fractured reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(7): 1 143–1 152.
- [5] ZHAO H F, CHEN H, LIU G H, et al. New insight into mechanisms of fracture network generation in shale gas reservoir[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 110(10): 193–198.
- [6] TAHERI S J. Numerical Modeling of hydraulic fracture propagation: accounting for the effect of stresses on the interaction between hydraulic and parallel natural fractures[J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2013, 22(4): 557–563.
- [7] CHUPRAKOV D A, ZHUBAYEV A S. A variational approach to analyze a natural fault with hydraulic fracture based on the strain energy density criterion[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2010, 53(3): 221–232.
- [8] AADNOY B, LOOYEH R. Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design[M]. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2011: 122–127.
- [9] IRWIN G R. Analysis of stress and strains near the end of a crack traversing a plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24: 361–364.
- [10] WESTGAARD H M. Bearing pressures and cracks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1939, 61: 49–53.
- [11] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1920, A221: 163–198.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 硬脆岩石的微观颗粒模型及其卸荷岩爆效应研究;
- (2) 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究;
- (3) 基于能量平衡模型的煤与瓦斯突出影响因素的灵敏度分析;
- (4) 冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究;
- (5) 基于夹持效应的普立特大桥隧道锚现场模型试验研究;
- (6) 单孔振荡式微水试验确定裂隙岩体各向异性渗透参数;
- (7) 用 SCDC 试样测试岩石动态断裂韧度的新方法;
- (8) 锚杆格构支护边坡振动台模型试验研究。

土工基础