

低渗储油层水力压裂裂缝延伸过程及成缝机理

张鹏海¹, 张子麟², 李明², 张濂源²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国石化胜利油田分公司 石油工程技术研究院, 山东 东营 257000)

摘 要: 为了评价花古6井低渗储油层的压裂效果,在该井地表建立了微震监测系统.基于微震监测结果,利用裂纹延伸路径分析方法及矩张量分析方法对压裂过程中裂缝延伸的时空过程及成缝机理进行了分析.分析结果表明:不同黏度液体注入时,裂纹的空间展布具有不同的特征,注入高黏液时储层中形成了裂缝密度较低的缝网,注入低黏液时储层中形成的缝网具有延伸路径短、分叉明显、密度高、范围大等特征,注入中黏液会在储层形成一些始于分支裂缝端部的裂纹;裂缝的破裂类型以剪切破裂为主(占比89.5%),并且破裂类型占比不受液体黏性的影响.

关 键 词: 低渗储油层;水压致裂;微震监测;裂缝延伸;成缝机理

中图分类号: TD 459

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)05-0745-05

Extension Process and Fracture Mechanism of Hydraulic Fractures in Low Permeability Reservoir

ZHANG Peng-hai¹, ZHANG Zi-lin², LI Ming², ZHANG Liao-yuan²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Institute of Petroleum Engineering, Shengli Oil Field Company, SINOPEC, Dongying 257000, China. Corresponding author: ZHANG Peng-hai, E-mail: zhangpenghai2005@163.com)

Abstract: In order to evaluate the hydraulic fracturing effect in the low permeability reservoir of Huagu 6 well, a microseismic monitoring system was established on the surface of the well. Based on microseismic data, the spatio-temporal extension process and fracture mechanism of hydraulic fractures are analyzed by means of crack extension path and moment tensor inversion. The results show that the spatial distribution characteristics of fractures changed with the liquid viscosity. The injection of high viscosity liquid formed a fracture network with low fracture density. The injection of low viscosity liquid formed a large-ranged dense fracture network with short extension path, and many crack branches. The injection of medium viscosity liquid formed some fractures that initiated from the branching fracture ends. The fracture type was mainly shear fracture(89.5%), and was not affected by the viscosity of the liquid.

Key words: low permeability reservoir; hydraulic fracturing; microseismic monitoring; fracture extension; fracture mechanism

水力压裂技术是一项提高低渗透油田采油率的重要技术^[1],是利用高压液体(水、细沙、胶黏剂等混合物)克服地应力及岩层强度,使岩层破裂产生裂缝^[2].

当岩层破坏时积蓄在岩层中的应变能会释放并向外传播弹性波,这种现象叫做微(地)震^[3].利用微震监测系统可以对微震波进行采集及分

析,进而获得压裂裂缝的特征,帮助评价压裂效果^[4].

起初,由于现场监测方法的限制,对水力压裂裂缝的研究集中在理论分析、数值模拟^[5]以及室内试验这三方面上.随着微震监测观测装备的进步和处理技术的发展,微震数据的质量得到提高并促使对现场压裂裂纹发展过程、形成机制的研

究方法不断完善^[6]. Aminzadeh 等^[7]通过模糊聚类方法分析了美国 Geysers 地热田水力压裂过程中裂缝网随时间的迁移路径;Eaton 等^[8]分析了加拿大一处地下 1 950 m 深的水平井水力压裂过程中诱发的微震信号,根据频谱特征发现裂纹的形成机制以张拉为主.然而截至目前,水力压裂裂缝形成及扩展的力学机理尚未被完全理解^[9].因此,如何更好地基于微震波监测数据,开展震源机制反演、震源破裂过程分析等深层次的研究,是研究的重点及难点.

本文结合胜利油田花古 6 井压裂过程中的微震监测结果,利用建立的裂纹延伸路径分析方法及矩张量分析方法分析裂缝延伸的时空过程及成缝机理.

1 工程概况

花古 6 井位于山东省高青县花沟镇花魏村东约 770 m,为济阳拗陷青城凸起西南部地垒高点.该井于 2016 年 9 月 19 日开钻,同年 12 月 2 日完井,完井垂直深度 3 167.71 m.储油层为常压低渗透荧光石英砂岩.压裂过程中采用速溶型低浓度瓜胶压裂液体系及变黏度多尺度充填技术:低黏液造分支裂缝;中黏液增加分支裂缝宽度,加强与主裂缝通道连通性;高黏胶液高砂比加砂,保持主裂缝高导流通道.

为了评价压裂效果,利用 15 个全内置式地面微地震监测台站在地面建立了“十字形”的微震监测系统(图 1).截取 2017 年 2 月 13 日台站采集到的波形进行滤波去噪、拾取到时、定位及计算震源参数等数据处理,作为本文压裂裂纹时空演化过程及产生机理分析的基础数据.

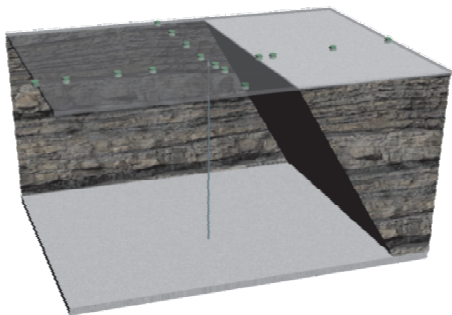


图 1 “十字形”微震监测台站布置示意图
Fig. 1 “Cruciform” microseismic monitoring stations layout

2 微震监测数据的分析

本文利用裂纹延伸路径分析方法及矩张量分析方法对压裂过程中裂纹的产生机理及裂纹扩展过程进行分析.

2.1 裂纹延伸路径分析方法

按照微震事件出现的时间先后顺序及空间距离,再现压裂裂缝的延伸路径,其过程如下:①连接射孔点及事件 1;②计算事件 2 与事件 1 的距离,及事件 1,2 与射孔点连线的夹角,若夹角 > 120°,则连接射孔点及事件 2,若夹角 < 120°,则连接事件 1 及事件 2;直到 > 120°后不需再判断;③计算事件 3 与事件 1,2 间的距离并连接最短距离.由于花古 6 井的射孔相位角为 180°,故采用 120°来区分初始的微震事件是由哪一侧的射孔诱发.以一侧射孔诱发的微震事件为例,按照以上方法再现的压裂裂纹延伸路径示意图如图 2 所示.

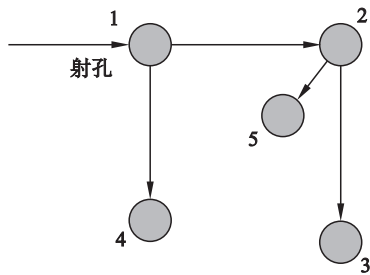


图 2 压裂裂纹延伸路径示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the fracture extension path

2.2 矩张量分析理论及方法

将地震震源力矩模型以二阶张量的形式表示.根据 Ohtsu 的理论^[10],经过远场近似,只考虑 P 波初动振幅,将震源简化为激冲函数模型,忽略时间项,信号的初动振幅 $A(x)$ 可以写成

$$A(x) = \frac{C_s R_e(t, r)}{R} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: $A(x)$ 为传感器 P 波信号初动振幅; C_s 为传感器响应系数,其包含了传感器自身固有属性与波导介质的材料特性; R 为震源至接收点的距离; $R_e(t, r)$ 为考虑传感器朝向 t 与射线传播路径方向(震源与接收点连线方向) r 的反射修正系数.

式(1)仅考虑了几何衰减.工程尺度上,必须考虑岩体的黏性对波的吸收衰减,需要将式(1)

修正为

$$A(x)=\frac{C_sR_e(t,r)e^{-\frac{\pi if}{v_pQ}R}}{R}\begin{bmatrix}r_1&r_2&r_3\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}m_{11}&m_{12}&m_{13}\\m_{12}&m_{22}&m_{23}\\m_{13}&m_{23}&m_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}r_1\\r_2\\r_3\end{bmatrix}.\tag{2}$$

式中： Q 为岩体 P 波品质因子； v_p 为 P 波波速； f 为频率成分，当传播距离较大时，可以将 f 用波拐角频率或主频替代。

当用于矩张量反演的微震事件传感器触发数大于 6 时，式(2)可利用最小二乘法很容易计算出震源矩张量 m_{pq} 。要进一步解译震源力学特性，需要对矩张量进行分解。矩张量的分解有多种方法，本文采用常规分解方法，将其分解为各向同性成分(ISO)、双力偶成分(DC)与补偿线性矢量偶极(CLV D)部分：

$$\begin{bmatrix}m_{11}&m_{12}&m_{13}\\m_{21}&m_{22}&m_{23}\\m_{31}&m_{32}&m_{33}\end{bmatrix}\Rightarrow\begin{bmatrix}M_1\\M_2\\M_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\frac{M_1+M_2+M_3}{3}\rightarrow M^{\text{ISO}}(Z)+\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&-1\end{bmatrix}\frac{M_1-M_3}{3}\rightarrow M^{\text{DC}}(X)+\begin{bmatrix}-1&0&0\\0&2&0\\0&0&-1\end{bmatrix}\frac{2M_2-M_1-M_3}{6}\rightarrow M^{\text{CLVD}}(Y).\tag{3}$$

式中， M_1,M_2,M_3 为 m_{pq} 的三个特征值，表示最大力偶，其对应的三个本征矢量 e_1,e_2,e_3 表示最大力偶方向，且 $M_1>M_2>M_3$ 。 M^{ISO} 表示震源区域的体积膨胀或塌缩， M^{DC} 表示震源剪切位错。由于大部分研究将震源破裂模型等效为双力偶，即纯剪切模型，因此用 M^{DC} 成分所占比例 X 来判断破裂源的剪切程度。设 Z 为各项同性张拉成分 M^{ISO} 所占比例， Y 为补偿项 M^{CLVD} 所占比例，由式(3)可得

$$\left.\begin{aligned}X&=\frac{3(M_1-M_3)}{-M_1+14M_2-7M_3},\\Y&=1-X-Z,\\Z&=\frac{2(M_1+M_2+M_3)}{-M_1+14M_2-7M_3}.\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

当 $X>80\%$ 时，判断震源为剪切破坏；当 $80\%\geq X\geq 50\%$ 时，判断震源为介于剪切与张拉间的混合型破坏；当 $X<50\%$ 时为张拉破坏。同

时，破裂面法向 n 与位错方向 l 与本征向量之间关系可以表示为

$$\left.\begin{aligned}l&=(e_1+e_3)/2,\\n&=(e_1-e_3)/2.\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

纯剪切源位错情况下， n 与 l 呈垂直关系；纯张拉时， n 与 l 呈平行关系。

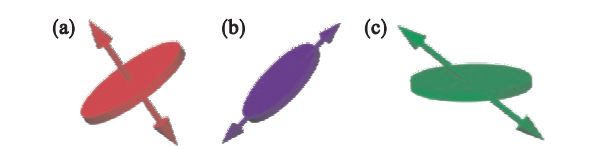


图 3 不同破裂类型示意图
Fig. 3 Schematic diagram of different fracture types
(a)—张拉破裂；(b)—剪切破裂；(c)—混合破裂。

3 微震数据分析结果

3.1 裂纹扩展的时空发展过程

2017 年 2 月 13 日 13:30~15:20 间裂纹的动态发展过程如图 4 所示，图中红色路径表示当前时段内新增的裂纹延伸路径，青色路径表示初始及当前时段之前的裂纹延伸路径。

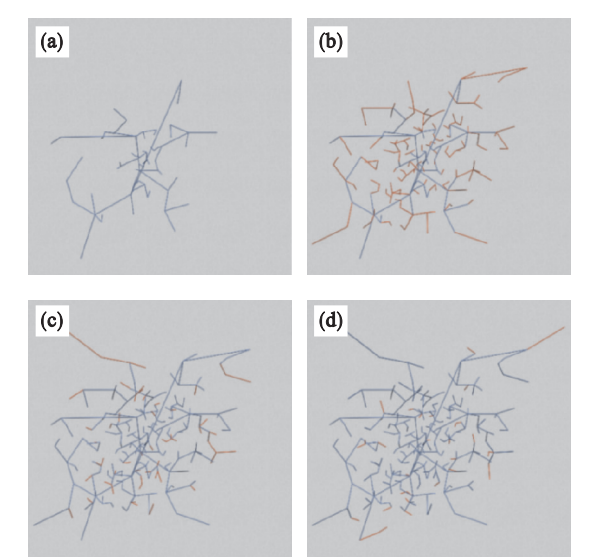


图 4 裂纹延伸路径的动态发展过程(俯视图)
Fig. 4 Development of fracture extension path(planform)
(a)—13:30~13:41 高黏液；(b)—13:41~14:25 低黏液；
(c)—14:25~14:55 中黏液；(d)—14:55~15:20 高黏液。

第一次注入高黏液过程中，在射孔点附近形成了一些延伸路径较短的裂缝，但在远离射孔点的区域延伸路径则较长且裂缝网中存在大面积的无裂纹延伸区域(图 4a)，由于注入高黏液的主要目的是保持主裂缝的宽度以保证其导流能力，因此在该过程中未形成高密度的裂缝网是完全可以接受的。

在注入低黏液过程中,裂纹的延伸路径以短程为主、具有十分明显的分叉特征,裂缝网的密度及分布范围均显著增加,裂缝网形状趋于圆形且裂缝网中无裂纹延伸区域面积明显变小(图 4b),这说明注入低黏液过程中形成了大量分支裂缝,达到了较好的压裂效果。

在注入中黏液过程中,新生的裂缝数量少于低黏液,除压裂范围北边界处存在 2 条十分明显的向外延伸裂纹,多数裂纹的延伸路径仍为短程(图 4c),因为注入中黏液的主要目的为增加分支裂缝宽度,所以该过程中新生的裂纹也大多始于低黏液注入期间产生的分支裂纹端部。

由于大量分支裂缝已经形成,所以当为保持主裂缝的宽度再次注入高黏液时,新生裂纹数量已明显减少(图 4d)。

由以上分析可以发现,注入不同黏度的液体时,裂纹的时空演化过程表现出了不同的特征。这既符合不同黏液的注入目的,又验证了不同黏液的注入效果。

3.2 微震事件震源机制的时空演化过程

2017 年 2 月 13 日 13:30~15:20 期间不同黏液注入情况下微震事件的震源机制时空演化过程如图 5 所示。图中圆盘的位置为定位微震事件所在的空间位置,圆盘的大小表示微震事件破裂尺度的大小,不同的颜色表示不同的破裂机制,蓝色为剪切破坏,红色为张拉破坏,绿色为混合破坏。

在所有微震事件中,剪切破裂源为 256 个、占总事件数的 89.5%,张拉破坏源及混合破裂源均为 15 个、分别占总事件数的 5.25%。

图 5 不同黏液注入情况下微震事件的震源机制演化过程
Fig. 5 Evolution of the focal mechanism of microseismic events under different viscosity liquid injection
(a)—13:30~13:41 高黏液; (b)—13:41~14:25 低黏液;
(c)—14:25~14:55 中黏液; (d)—14:55~15:20 高黏液。

低黏液注入期间产生微震事件 134 个,其中剪切破裂源 122 个,占该期间内总事件数的 91%,略高于平均水平(图 5b)。中黏液注入期间产生微震事件 56 个,其中剪切破裂源 50 个,占该期间内总事件数的 89.3%,略低于平均水平(图 5c)。高黏液注入期间定位微震事件 96 个,其中剪切破裂源 84 个,占该期间内总事件数的 87.5%,略低于平均水平(图 5a、图 5d)。通过以上数据可以发现:不同的黏液注入对微震事件的震源机制,即水压致裂的裂纹破裂类型影响不大,可认为裂纹破裂类型与液体的黏性无关。

张拉型裂纹占比低、剪切型裂纹占比高这一现象与绝大多数文献及报告中记载的监测井微震分析结果相符,但实验室尺度下水压致裂的物理模型实验分析结果表明水压致裂产生的裂纹主要为张拉型,两种尺度下观测到完全相反的物理现象,其原因:

- 1) 从地应力对深部岩体破裂类型的影响来看,三向压应力作用下岩石的破裂模式多为剪切破裂,这已被大量的室内实验所证实并成为学者们的共识。一般来说,地下深部受到较高的三向压应力作用,高压注液难以克服地应力岩体本身的抗拉强度使深部岩体出现拉破坏。
- 2) 从水对岩石强度的影响来看,浆液被压入岩体的原生节理裂隙中,通过水的润滑作用可以降低节理裂隙两侧岩石间的摩擦系数,诱发节理裂隙两侧岩石的滑移,产生剪切破裂。
- 3) 张拉破裂形成的物理过程主要为原先为一连续体的岩石介质在应力作用下相互分离,基本无摩擦现象且张拉裂纹一般不贯穿岩石颗粒,故释放的能量较小,微震信号的幅值较低。而剪切破裂形成的物理过程不仅包括原先为一连续体的岩石介质在应力作用下相互分离现象,还包括已形成不连续面的两侧岩石介质进行相对运动,即摩擦现象。并且在剪切裂纹经过的路径上常见被贯穿的岩石颗粒,故释放的能量较大,微震信号的幅值较高。在同等技术条件下,剪切破裂释放的微震信号更容易被识别到。
- 4) 从传播介质对微震波的衰减效应来看,张拉破裂诱发的微震信号频率较高,剪切破裂诱发的微震信号频率较低,信号频率越高在传播过程中衰减得越快,所以当张拉破裂诱发的微震波经过几千米的路程传播到地表传感器所在位置时,其信号常衰减至与环境噪声相同水平,极低的信噪比使其难以被分辨出来。岩性相同的条件下,传播路程直接决定了波的衰减程度,衰减效应也是

引起现场大尺度及实验室内小尺度下观测到不同物理现象的最主要原因。

其中第 1), 2) 项因素为影响震源机制的本质因素, 而第 3), 4) 项为间接因素, 是通过影响微震波的强弱来影响采集及分析结果。基于以上分析, 可以发现以剪切破裂为主的破裂机制是符合实际情况的, 但由于较低的能量及较强的干扰导致张拉破裂诱发的微震波难以被监测和识别到, 影响了拉伸剪切破裂占比的准确性(这里暂不考虑分析方法的影响因素)。也正是由于该原因, 花古 6 井水压致裂过程中拉伸破裂的真实占比应略高于 5.25%, 但真实占比无法通过微震监测的方法直接获得。

4 结 论

1) 花古 6 井压裂过程中不同黏度液体注入时, 裂纹的时空演化过程具有不同特征。以保持主裂缝宽度为目的注入高黏液会在储层形成裂纹密度较低的缝网。以制造分支裂缝为目的注入低黏液会在储层形成以延伸路径短、分叉明显、密度高、范围大为特征的缝网。以增加分支裂缝宽度为目的注入中黏液会在储层形成一些始于分支裂缝端部的裂纹。

2) 花古 6 井压裂裂缝的破裂类型以剪切破裂为主(占比 89.5%), 并且破裂类型占比不受液体黏性的影响。剪切型裂纹占比高这一现象产生的原因可归结为高地应力、水的润滑作用、张拉破裂释放能量小且衰减效应明显这 4 个因素。

参考文献:

[1] Economides M J, Nolte K G. Reservoir stimulation [M].

Chichester: Wiley, 2000: 1 – 30.

[2] Ma X, Zou Y, Li N, et al. Experimental study on the mechanism of hydraulic fracture growth in a glutenite reservoir [J]. *Journal of Structural Geology*, 2017, 97: 37 – 47.

[3] Zhang P, Yang T, Yu Q, et al. Study of a seepage channel formation using the combination of microseismic monitoring technique and numerical method in Zhangmatun iron mine [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 3699 – 3708.

[4] 陈海潮, 唐有彩, 钮凤林, 等. 利用微地震参数评估水力压裂改造效果研究进展 [J]. *石油科学通报*, 2016, 1 (2): 198 – 208.

(Chen Hai-chao, Tang You-cai, Niu Feng-lin, et al. Recent advances in microseismic monitoring and implications for hydraulic fracturing mapping [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1 (2): 198 – 208.)

[5] Park S, Kim K I, Kwon S, et al. Development of a hydraulic stimulation simulator toolbox for enhanced geothermal system design [J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 879 – 895.

[6] Gischig V S, Doetsch J, Maurer H, et al. On the link between stress field and small-scale hydraulic fracture growth in anisotropic rock derived from micro-seismicity [J]. *Solid Earth Discussions*, 2018, 9 (1): 1 – 40.

[7] Aminzadeh F, Tafti T A, Maity D. An integrated methodology for sub-surface fracture characterization using microseismic data: a case study at the NW Geysers [J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 54 (54): 39 – 49.

[8] Eaton D W, Baan M V D, Birkelo B, et al. Scaling relations and spectral characteristics of tensile microseisms: evidence for opening/closing cracks during hydraulic fracturing [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 196 (3): 1844 – 1857.

[9] Chen Z, Wang M. Pore - scale modeling of hydromechanical coupled mechanics in hydrofracturing process [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2017, 122: 2410 – 3429.

[10] Grosse C U, Ohtsu M. Acoustic emission testing [M]. Berlin: Springer, 2008: 175 – 200.