

文章编号: 1000-7598(2012)10-3189-05

重复压裂转向机制流-固耦合分析

岳迎春^{1,2}, 郭建春¹

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500; 2. 中石化西南石油局井下作业公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 重复压裂已成为油田老井挖潜、稳产增产的重要手段, 而地应力转向机制与压裂时机选择一直是制约该技术增产效果的关键问题。对 ABAQUS 有限元软件平台进行了二次开发, 考虑储层孔隙度和渗透性随岩石体积应变的动态演化, 实现了流体压力变化与岩石物性参数的全面耦合, 并分析了重复压裂转向机制。结果表明, 地应力转向现象普遍存在, 人工裂缝对地应力的影响范围有限, 而孔隙压力变化是造成地应力转向的主要因素; 随着生产的持续进行, 地层压力下降变缓, 岩石体积应变变化趋缓, 导致渗透率下降趋于平稳, 应力转向距离逐渐增大并最终趋稳; 应力差越大、应力转向距离越小, 越难形成重复压裂转向裂缝。其研究结果实现了流-固耦合作用下地应力转向的可视化描述, 直观地模拟结果有利于指导重复压裂的应用实施。

关键词: 重复压裂; 应力转向; 流-固耦合; 有限元

中图分类号: TE 357.1

文献标识码: A

Fluid-solid coupling analysis of reorientation mechanism of refracturing

YUE Ying-chun^{1,2}, GUO Jian-chun¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Downhole Operation Company, Sinopec Southwest Petroleum Bureau, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: The refracturing technology has become an important means to develop the potential of old wells and stabilize or increase the production in oil field, while the reorientation mechanism and fracturing time are the key issues of restraining the stimulation effects of refracturing. This article makes the secondary development of ABAQUS finite element software platform, considers the dynamic evolution of rock porosity and permeability with the volumetric strain, achieves the overall coupling of fluid pressure change and physical property parameters, and makes the fluid-solid coupling analysis of reorientation mechanism of refracturing. The results show that stress reorientation phenomenon is common; the impact range of artificial fracture on the stress is limited which is not enough to form reorientation fracture; and the change of pore pressure is the major factor affecting stress direction; with the continuing progress of production, formation pressure and pore volume decrease, the change of volumetric strain of rock becomes slow, which makes the permeability decreases to a stable value; and the distance of stress reorientation increases and eventually turns to be stable finally; the greater stress differences, the more difficult the reorientation fracture forms because of little stress reorientation distance. This article realizes the visual depiction of stress reorientation in the condition of fluid-solid coupling; and the visual simulation is benefit for guiding the application and implementation of refracturing.

Key words: refracturing; stress reorientation; fluid-solid coupling; finite elements

1 引言

大量的现场和室内试验研究表明^[1-5], 油气井压裂后, 人工裂缝的存在能改变近井地带地应力的方向和大小; 在油气藏开采过程中, 由于孔隙流体压力的变化, 一方面要引起岩石骨架应力的变化, 由此导致岩石物性参数的变化; 另一方面, 物性参数的变化又会影响孔隙流体的流动和压力的分布,

从而形成流-固耦合的交互作用过程。这些因素改变了含水力裂缝地层的应力场分布, 产生应力重定向现象^[6-8], 使重复压裂可能产生不同于初次裂缝方向的新裂缝, 达到改造储层、提高采收率的目的。

目前对重复压裂裂缝转向理论的研究中, 普遍采用数学建模方式是将地应力场变化分为人工裂缝诱导应力场、地层压力诱导应力场和温度变化诱导应力场 3 部分^[9-11], 但目前的重复压裂研究均未充

分考虑流-固耦合作用对应力转向的影响, 计算结果误差较大, 且无法直观显示地应力变化的动态过程。本文旨在通过 ABAQUS 有限元软件平台, 建立流-固耦合的重复压裂应力场分析有限元模型, 以更准确地计算压裂井应力变化, 直观地反映应力转向过程, 更有效地指导生产实践。

2 岩体流固耦合离散模型

(1) 平衡方程

根据虚功原理, 岩土介质的虚功与作用在该岩土体上作用力所产生的虚功相等, 表示为^[12]

$$\begin{aligned} & \int_V \delta \varepsilon^T \mathbf{D}_{ep} \frac{d\varepsilon}{dt} dV + \int_V \delta \varepsilon^T \mathbf{D}_{ep} \left(m \frac{(s_o + p_o \xi)}{3K_s} \frac{dp_o}{dt} \right) dV - \\ & \int_V \delta \varepsilon^T m (s_o + p_o \xi) \frac{dp_o}{dt} dV = \int_V \delta u^T \frac{df}{dt} dV + \\ & \int_S \delta u^T \frac{dt'}{dt} dS \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\delta \varepsilon$ 为虚应变; δu 为虚位移; $\mathbf{D}_{ep}$ 为弹塑性矩阵; ε 为应变; V 为体积; t' 为面力; f 为体力; u 为位移; S 为面积; s_o 为液相饱和度; p_o 为液相压力; m 为 $[1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$ 。

(2) 连续方程

用达西定律来描述流体的渗流, 推导渗流的连续性方程。根据质量守恒原理, 在 dt 时间内净流入某一体积岩石内的液量等于其内部液量的增加, 连续性方程表示为^[12]

$$\begin{aligned} & s_o \left(m^T - \frac{m^T \mathbf{D}_{ep}}{3K_s} \right) \frac{d\varepsilon}{dt} - \nabla^T \left[k' k_r \left(\frac{\nabla p_o}{\rho_o} - g \right) \right] + \\ & \left\{ \xi \phi + \phi \frac{s_o}{K_o} + s_o \left[\frac{1-\phi}{3K_s} - \frac{m^T \mathbf{D}_{ep} m}{(3K)^2} \right] (s_o + p_o \xi) \right\} \frac{dp_o}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: k' 为初始渗透率张量和液体密度的乘积; k_r 为比例渗透系数; K_s 为岩石颗粒压缩模量; ξ 为饱和度随压力变化率; K_o 为液体的体积模量; g 为重力加速度; ϕ 为孔隙度; ρ_o 为液相密度。

(3) 有限元离散

定义形函数为

$$\left. \begin{aligned} u &= N_u \bar{u} \\ \varepsilon &= B \bar{u} \\ p_o &= N_p \bar{p}_o \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\bar{u}$ 为节点位移; $\bar{p}_w$ 为节点孔隙压力。

将式 (3) 带入式 (1) 得到:

$$K \frac{d\bar{u}}{dt} + C \frac{d\bar{p}_o}{dt} = \frac{df}{dt} \quad (4)$$

上式为固相有限元列式, 其中

$$K = \int_V B^T \mathbf{D}_{ep} B dV \quad (5)$$

$$C = \int_V B^T D_{ep} m \frac{(s_o + \xi p_o)}{3K_s} N_p dV - \int_V B^T (s_o + \xi p_o) m N_p dV \quad (6)$$

$$df = \int_V N_u^T df dV + \int_S N_u^T dt dS \quad (7)$$

渗流场的边界条件有流量边界条件和孔压边界条件两种, 本文采用流量边界条件进行流-固耦合的有限元离散推导, 流量边界条件表达式为

$$-n^T k k_r \left(\frac{\nabla p_o}{\rho_o} - g \right) = q_o \quad (8)$$

式中: n 流量边界的单位法向; q_o 为单位时间流速。

使用 Galerkin 方法, 即:

$$\int_V a^T \bar{A} dV + \int_S b^T \bar{B} dS = 0 \quad (9)$$

式中: $\bar{A}$ 为控制方程; $\bar{B}$ 为通过边界的连续性方程; a 、 b 为任意函数。将式 (2) 作为 $\bar{A}$ 、式 (8) 作为 $\bar{B}$, 以及形函数表达式 (3) 代入式 (9), 并令 $a = -b$, 经过简化可得:

$$E \frac{d\bar{u}}{dt} + F \bar{p}_o + G \frac{d\bar{p}_o}{dt} = \hat{f} \quad (10)$$

其中

$$E = \int_V N_p^T \left[s_o \left(m^T - \frac{m^T \mathbf{D}_{ep}}{3K_s} \right) B \right] dV \quad (11)$$

$$F = \int_V (\nabla N_p)^T k k_r \nabla N_p dV \quad (12)$$

$$G = \int_V N_p^T \left\{ s_o \left[\left(\frac{1-\phi}{K_s} - \frac{m^T \mathbf{D}_{ep} m}{(3K)^2} \right) \right] (s_o + p_o \xi) + \xi \phi + \phi \frac{s_o}{K_o} \right\} N_p dV \quad (13)$$

$$\hat{f} = \int_S N_p^T q_o dS - \int_V (\nabla N_p)^T k k_r g dV \quad (14)$$

将式 (4)、(10) 联合, 得到应力—渗流耦合方程表达式为

$$\begin{bmatrix} K & C \\ E & G \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dt} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3 有限元模型建立

3.1 软件二次开发

假设岩石颗粒不可压缩, 岩石的体积变化量就等于孔隙体积的变化量, 根据体积应变定义 $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ 可知:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta V_p}{V_0} = \frac{V_s \Delta \phi}{V_s (1 + \phi_0)} = \frac{\Delta \phi}{(1 + \phi_0)} = \frac{\phi - \phi_0}{1 + \phi_0} \quad (16)$$

式中: ε_v 为体积应变; V_p 为孔隙体积; V_s 为固相体积。

根据式 (16) 可得到相应的孔隙度随体积应变的表达式。

渗透率与孔隙度、体积应变的关系为

$$k = k_0 \left[\left(\frac{1}{\phi_0} \right) (1 + \varepsilon_v)^3 - \left(\frac{1 - \phi_0}{\phi_0} \right) (1 + \varepsilon_v)^{-1/3} \right]^3 \quad (17)$$

式中: k 为目前渗透率; k_0 为原始渗透率。

通过 ABAQUS 提供的子程序接口^[13], 编写用户自定义子程序, 考虑储层孔隙度和渗透性的动态演化, 在计算分析时调用结果中的体积应变, 结合渗透率、孔隙度与体积应变的关系式, 得到出岩石渗透率、孔隙度, 并作为下一步的初始物性参数进行计算, 从而实现体积应变与岩石物性参数的耦合作用。

3.2 有限元模型建立

由于压裂裂缝为对称双翼缝, 故采用含单条裂缝的地层建立流-固耦合有限元模型。 EF 为单翼人工裂缝, 缝长为 50 m。点 E 为井眼所在位置, AE 、 ED 边设置为对称边界, AB 、 CD 边分别加载最小主应力 24 MPa, BC 边加载最大水平主应力 28 MPa, 初始地层压力设置为 15 MPa, 裂缝壁面加载流体流速为 $2 \text{ m}^3/\text{d}$, 岩石弹性模量为 23 GPa, 泊松比为 0.25。

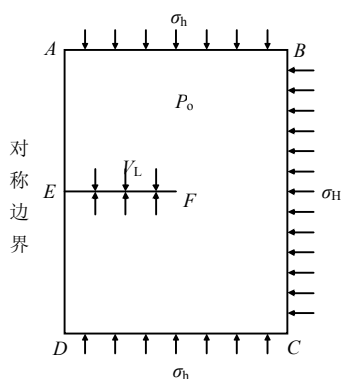


图 1 压裂地层流-固耦合有限元模型示意图

Fig.1 Sketch of fluid-solid interaction finite element model in fracturing formation

建立用于流-固耦合分析的 soil 分析步, 同时在材料属性设置时调用自定义子程序, 实现流体压力变化与岩石物性参数的耦合作用。

4 结果分析

图 2 为压裂井地层孔隙压力分布云图。从图可以看出, 在裂缝周围, 地层压力下降明显; 地层压力由供给边界向人工裂缝呈递减分布, 且等压线为椭圆形。

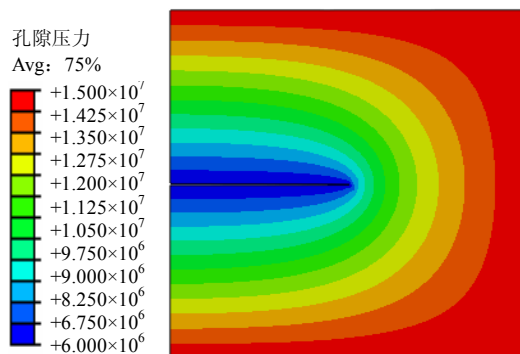


图 2 压裂井孔隙压力分布云图

Fig.2 Nephogram of pore pressure distribution near fractured wells

图 3 为压裂井最大水平主应力云图, 可以看到, 人工裂缝的存在产生了诱导应力场, 特别是在裂缝尖端产生了明显的应力集中现象, 其应力值远远大于地层中其他区域。人工裂缝诱导应力场和地层孔隙压力变化的双重作用, 势必对地层主应力大小和方向产生影响。

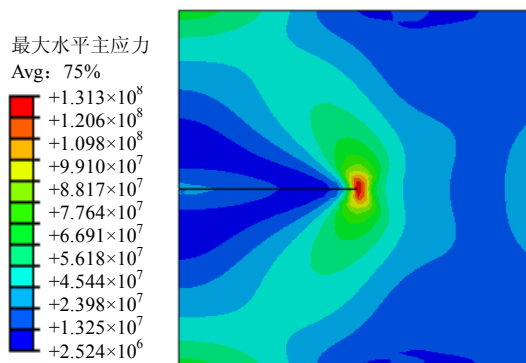


图 3 压裂井最大水平主应力云图

Fig.3 Nephogram of maximum horizontal principal stresses of fractured wells

图 4 为模拟计算的地层压力和渗透率随时间变化情况。通过地层压力的变化来计算岩石体积应变, 由体积应变得出渗透率, 实现流体压力与岩石物性参数的耦合作用。在生产初期, 岩石孔隙体积较大,

随地层压力的变化岩石体积应变较大,造成渗透率下降速率较快;当生产进行到一定程度时,孔隙体积降低到较小状态,进一步压缩难度加大,渗透率的变化趋于平缓。此时可考虑进行重复压裂以改善地层渗流条件。

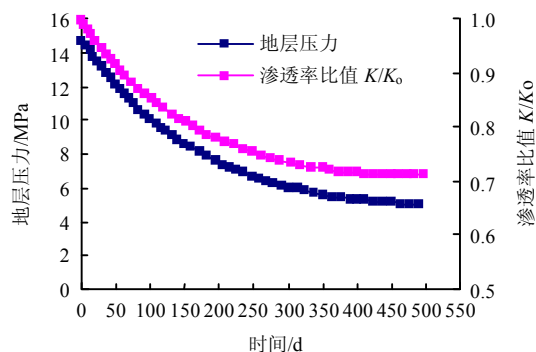


图4 地层压力和渗透率随时间变化曲线

Fig.4 Pore pressure and permeability vs. time

图5为裂缝附近最大主应力矢量图。当较大的地层压力改变和人工裂缝诱导应力场双重作用时,可观察到明显的最大主应力转向现象。裂缝周围的最大水平主应力由原始的沿裂缝方向变为垂直于裂缝方向。最大水平主应力方向决定着压裂裂缝的走向,转向的地应力为重复压裂产生新裂缝提供了可能。

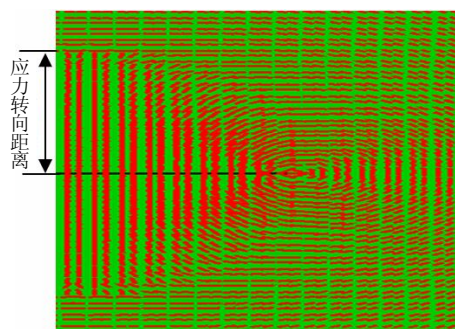


图5 最大水平主应力矢量图

Fig.5 Vector map of maximum horizontal principal stresses

由于多种诱导因素对应力场的影响,地应力转向现象是普遍存在的。将应力转向距离定义为发生应力转向区域到人工裂缝的最大垂直距离(图5)。当未开始生产时,地层压力未发生变化,此时应力场的改变由人工裂缝诱导应力场引起。从图6可以看出,生产时间为0时,发生应力转向的区域很小,可见人工裂缝对应力场的影响局限于靠近裂缝的较小范围内,无法满足重复压裂形成转向裂缝的条件,这与现场上无法连续两次施工压开两条不同裂缝的

实际情况相符合。随着生产的进行,地层孔隙压力降低,转向距离随时间明显增加。可见,孔隙压力变化是引起应力转向的主要因素。在生产后期,孔隙压力变化趋缓,转向距离的增加也趋于平缓。

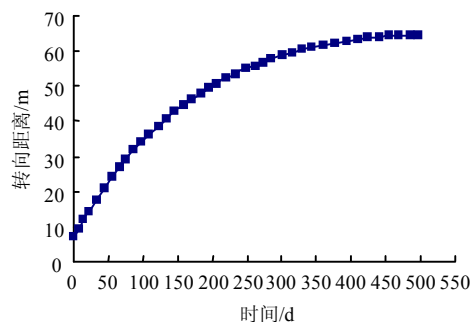


图6 应力转向距离随时间变化曲线

Fig.6 Stress reorientation range vs. time

在相同条件下,改变最大、最小水平主应力差值,模拟分析了应力差对转向距离的影响。如图7所示,应力差越大,转向距离越小,越难形成重复压裂转向裂缝。

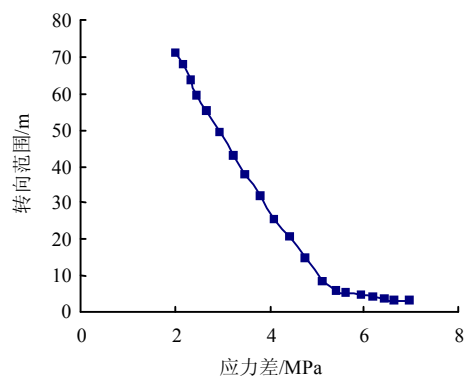


图7 应力差对应力转向距离的影响

Fig.7 Impact of stress difference on stress reorientation range

5 结论与认识

(1) 对 ABAQUS 软件实施了二次开发,进行了重复压裂应力场的流-固耦合模拟,实现了地应力转向过程的可视化动态描述,直观地模拟结果有利于指导重复压裂的应用实施。

(2) 模拟结果表明:随着生产的进行,地层渗透率逐渐下降并最终趋于平缓。目前渗透率与原始渗透率比值可作为重复压裂时机选择的参考因素;地应力转向现象普遍存在,人工裂缝对地应力的影响范围有限,孔隙压力改变是造成地应力转向的主要因素;随着生产时间的增加,转向距离逐渐增大

并最终趋于平稳; 水平主应力差越大, 诱导应力产生的应力转向距离越小, 越难形成转向裂缝。

参 考 文 献

- [1] 姚飞, 翁定为, 李阳, 等. 重复压裂前地应力场预测软件研究及现场应用[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 130—133.
YAO Fei, WONG Ding-wei, LI Yang, et al. Study and application of stress field prediction software for refractured oil wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 130—133.
- [2] 刘迎香, 赵宇新, 杨永平, 等. 重复压裂裂缝延伸模拟实验研究[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(1): 92—93.
LIU Ying-xiang, ZHAO Yu-xin, YANG Yong-ping, et al. Fracture extension simulating experiment in refracturing process[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2004, 26(1): 92—93.
- [3] 张广清, 陈勉, 王群立, 等. 最优重复压裂时机模型及模拟软件开发[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(4): 53—57.
ZHANG Guang-qing, CHEN Mian, WANG Qun-li, et al. Modeling optimal timing for refracturing and simulation software development[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2008, 30(4): 53—57.
- [4] 姚兆言, 张晓兰, 王百坤, 等. 地应力变化对重复压裂技术的影响[J]. 钻采工艺, 2008, 31(增刊): 37—39.
YAO Zhao-yan, ZHANG Xiao-lan, WANG Bai-kun, et al. Impact of stress changes on repeated fracturing[J]. *Drilling & Production Technology*, 2008, 31(Supp.): 37—39.
- [5] 唐海军, 胡永全, 景步宏, 等. SN 油田重复压裂技术界限研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 94—96.
TANG Hai-jun, HU Yong-quan, JIN Bu-hong, et al. Re-fracturing technology conditions in SN oil field[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(5): 94—96.
- [6] 张公社, 赵蓓, 石惠宁, 等. 重复压裂裂缝转向的 ANSYS 有限元模拟[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6): 141—144.
ZHANG Gong-she, ZHAO Bei, SHI Hui-ning, et al. Finite element simulation analysis of refracture reorientation based on ANSYS[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(6): 141—144.
- [7] NICOLAS P R, MUKUL M S. Quantifying transient effects in altered-stress refracturing of vertical wells[J]. *SPE Journal*, 15(3): 770—782.
- [8] SIEBRIT S E, ELBEL J L, HOOVER R S, et al. Refracture reorientation enhances gas production in bacnett shale tight gas wells[R]. [S.l.]: [s.n.], 2000.
- [9] 胡永全, 赵金洲, 刘洪, 等. 考虑气井生产影响的重复压裂裂缝重定向研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 87—89.
HU Yong-quan, ZHAO Jin-zhou, LIU Hong, et al. Study on crack reorientation for multi-fracturing considering influence of gas production[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(5): 87—89.
- [10] 郭春华, 刘林, 李玉华. 新场气田致密低渗透气藏重复压裂工艺技术[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(4): 77—79.
GUO Chun-hua, LIU Lin, LI Yu-hua. The research and application of re-fracture in Xinchang gas field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 34(4): 77—79.
- [11] 程远方, 沈海超, 赵益忠, 等. 天然气水合物藏开采物性变化的流固耦合研究[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 607—611.
CHENG Yuan-fang, SHEN Hai-chao, ZHAO Yi-zhong, et al. Study on fluid solid coupling of physical variation of gas hydrate reservoirs during natural gas development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 607—611.
- [12] 陈卫忠, 伍国军, 贾善坡. ABAQUS 在隧道及地下工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [13] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.