

文章编号: 1000-7598-(2009)01-0169-06

# 水力压裂扩展特性的数值模拟研究

连志龙<sup>1,2</sup>, 张 劲<sup>3</sup>, 王秀喜<sup>1</sup>, 吴恒安<sup>1</sup>, 薛 炳<sup>1</sup>

(1.中国科学技术大学 力学与机械工程系中科院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027;

2.中国石油集团钻井工程技术研究院 钻井工艺研究所, 北京 100195; 3.中国石油大学 石油与天然气工程学院, 北京 102249)

**摘 要:** 采用 ABAQUS 建立了水力压裂计算模型, 模拟了地应力、岩石力学特性、压裂液流体特性等各种复杂因素对水力压裂扩展的影响。通过计算分析得到一些有益结论: (1) 在注入压力一定的情况下起裂压力与最小水平地应力、临界应力、初始孔隙压力成正比, 而与压裂液黏度、最大水平地应力、弹性模量无关; (2) 裂缝扩展长度和最大缝宽与最小水平地应力、初始孔隙压力、弹性模量成反比, 而与最大水平地应力无关; (3) 水力压裂作业中, 缝长的扩展过程可分为无扩展阶段、快速扩展阶段、稳定扩展阶段以及缓慢扩展阶段等 4 个阶段。研究结论对于水力压裂作业优化具有参考价值。

**关 键 词:** 水力压裂; 数值模拟; 有限元

中图分类号: TV 131; O 241

文献标识码: A

## Simulation study of characteristics of hydraulic fracturing propagation

LIAN Zhi-long<sup>1</sup>, ZHANG Jin<sup>2</sup>, WANG Xiu-xi<sup>1</sup>, WU Heng-an<sup>1</sup>, XUE Bing<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Materials Behavior and Design, Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. CNPC Drilling Research Institute, Drilling Technology Department, Beijing 100195, China;

3. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** A simulation model of hydraulic fracturing propagation is proposed by using the software of ABAQUS. The key factors of geotectology such as in-situ stress distribution, mechanical properties, fracturing fluid properties etc, which affect on the characteristics of fracturing propagation, are studied with the model. Several conclusions are drawn from the simulation results. When injecting pressure is constant, the fracture initiation pressure is proportional to the magnitude of minimal horizontal stress, critical stress and initial pore pressure, elastic modules, and is independent of fracturing fluid viscosity and maximal horizontal stress. The fracture length and maximal fracturing width are inversely proportional to the minimal horizontal stress, initial pore pressure and elastic modules. Further more they are independent of maximal horizontal stress. The process of hydraulic fracturing may be divided into four stages, namely no growth, quick growth, steady growth and slow growth stages. The obtained conclusions are of much significance for the perforation parameter optimization and design of hydraulic fracturing treatments.

**Key words:** hydraulic fracturing; numerical simulation; finite elements

## 1 引 言

水力压裂缝的扩展与地应力分布、岩石的力学特性、压裂液流体特性、注入压力等各种复杂因素有关, 人们对水力压裂特性已经做了大量研究<sup>[1-4]</sup>, 如文献[1]建立了数学模型模拟水驱诱发的裂缝扩展, 认为注入率和孔隙驱替率对裂缝扩展有重要的影响, 可通过它们控制裂缝的扩展。文献[2]建立了拟三维水力压裂模型, 模拟结果显示如果油藏储层和邻近隔层的弹性模量或应力差越大越有利于限制

垂直裂缝穿层。文献[3]在二维模型中使用三维概念方法预测水力压裂缝形状, 该方法可以模拟层状油藏的二维裂缝扩展模型。文献[4]采用有限差分法模拟了各种参数(包括岩石弹性模量、地应力、压裂液黏性、排量等)对层状油藏水力压裂扩展的影响, 模拟结果证实, 层状油藏如果具有薄差隔层, 则可一次压裂多层, 一旦隔层厚或者隔层和储层地应力差很大, 则必须分层压裂。

收稿日期: 2006-12-16

作者简介: 连志龙, 男, 1977, 博士研究生, 研究方向为水力压裂数值模拟。E-mail: jakelen@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 王秀喜, 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算力学。E-mail: xxwang@ustc.edu.cn

在国内,无论是理论方面,还是实践方面都对水力压裂问题进行了长期的研究,形成了成熟的技术系统,如整体压裂技术、深井和超深井压裂技术、重复压裂技术等<sup>[5]</sup>。测试技术也得到了相应的发展,可测得储层中天然裂缝和人工裂缝方向、长度<sup>[6]</sup>。同时,数值模拟方法上也做到了对国际先进模型和理论及时吸收和改进,开发了一批软件Terra Frac、FracproPT10.0、Stimplan (F3D和P3D裂缝模拟)等<sup>[7-8]</sup>,这些研究成果大大促进了水力压裂技术在油气开采中的应用,取得了丰硕成果。

但是,由于已有的研究成果只考虑了缝内流场与裂缝周围岩层的边界耦合效应,尚非真正的流固耦合,并且这些方法只能处理水力压裂的某些特定问题,应用面过于局限。文献[9]采用有限元软件ABAQUS模拟水力压裂扩展问题,该方法充分考虑渗流场与固体应力场的耦合效应,并且能够处理各种复杂的水力压裂缝扩展问题,如多缝同时扩展、裂缝转向等。在此基础上,本研究将进一步分析压裂液黏度、地应力、岩石弹性模量、临界应力、初始孔隙压力等各种因素对水力压裂的影响,最后分析压裂过程中裂缝长度的动态变化过程,因此本文的结果对于加深认识水力压裂过程的机制具有一定的帮助,对于水力压裂作业优化具有参考价值。

## 2 基本方程

在本文的水力压裂力学模型中,假设地层为各向同性孔隙材料,组成储层的岩石颗粒为不可压缩;储层完全饱和,并且孔隙中的流体是不可压缩的;裂缝扩展过程是一个平面应变准静态过程。

水力压裂扩展过程是压裂液流体流动与岩土体变形动态耦合的过程。在数值模拟中可通过耦合求解应力平衡方程式(1)和流体连续性方程式(2)实现。

应力平衡方程<sup>[10]</sup>为

$$\int_V (\bar{\sigma} - u_w I) : \delta \varepsilon \delta dV = \int_S t \delta v dS + \int_V f \delta v dV + \int_V n \rho_w g \delta v dV \quad (1)$$

流体连续性方程<sup>[10]</sup>为

$$\frac{d}{dt} \left( \int_V \frac{\rho_w}{\rho_w^0} n dV \right) = - \int_S \frac{\rho_w}{\rho_w^0} n m \cdot v_w dS \quad (2)$$

式中:  $\delta v$  为虚速度场;  $\delta \varepsilon$  为虚变形率;  $\bar{\sigma}$  为真(柯西)有效应力;  $t$  为单位面积表面外力;  $f$  为单位体积力(不包括流体重力);  $\rho_w$  为流体密度;  $\rho_w^0$

为流体参考密度;  $g$  为重力加速度;  $v_w$  为渗流速度;  $n$  为孔隙率;  $n$  为表面的外法线方向。

本文选择临界应力作为裂纹扩展准则,临界应力准则公式<sup>[11]</sup>为

$$f = \sqrt{\left( \frac{\hat{\sigma}_n}{\sigma^f} \right)^2 + \left( \frac{\hat{\tau}_1}{\tau_1^f} \right)^2 + \left( \frac{\hat{\tau}_2}{\tau_2^f} \right)^2}, \quad \hat{\sigma}_n = \max(\sigma_n, 0) \quad (3)$$

式中:  $\hat{\sigma}_n$  为指定点处的法向应力分量;  $\hat{\tau}_1$  和  $\hat{\tau}_2$  为指定点处的剪切应力分量;  $\sigma^f$ 、 $\tau_1^f$  和  $\tau_2^f$  分别为临界法向应力和临界剪切应力,其值由用户指定。

假设水力压裂缝内的流体流动为2块平行板间的层流流动,其压降梯度<sup>[12]</sup>满足如下方程:

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{12\mu q}{h_f w^3} \quad (4)$$

式中:  $\mu$  为压裂液黏性系数;  $w$  为裂缝宽度;  $q$  为单翼流量;  $h_f$  为裂缝高度;  $P_0$  为井底压力。

进一步假设裂缝的形状为椭圆形,可推导得到裂缝面内压降方程式(5),根据压降方程编写用户子程序作为裂缝面上的渗透压力边界条件嵌入到ABAQUS中。椭圆形裂缝面内的压降方程<sup>[13]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} p &= - \frac{12\mu q x}{h_f w_0^2 w} + P_0, & (p > H); \\ p &= H, & (p < H) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $H$  为根据渗流方程计算估计求得的渗透压力值;  $w_0$  为最宽处宽度。

## 3 影响水力压裂缝扩展的因素分析

考虑某油藏的一个储层,沿与纸面垂直方向截取单位厚度的岩层建立如图1所示的模型,该模型作为平面应变问题分析。模型的尺寸为 100.0 m × 100.0 m,射孔段的长度为 1.0 m,位于对称边的中间处。射孔段A和预设裂纹绑定段B对较远处的D、E、F边影响不大,因此可以取D、E、F边为0位移约束,并且孔隙压力保持与初始状态一致。同时考虑到裂纹的形状是对称分布的,它以通过井筒并且与裂纹扩展方向相垂直的面为对称面,因而把C边设置为位移对称约束边界(图1)。

模型中岩层采用线弹性孔隙材料模型,并选择最常见的油藏地质参数作为模型的计算参数,其中弹性模量为 39.2 GPa,泊松比为 0.25。根据ABAQUS的临界应力准则,假设距裂尖正前方 0.09 m处岩石的临界抗拉强度为 6.0 MPa。为了保证裂缝沿X方向扩展,根据裂缝扩展方向为垂直于最小地应力的原理,假设初始最大水平地应力(在

$X$ 方向上)为 15.0 MPa, 初始最小水平地应力(在  $Y$ 方向上)为 10.0 MPa。初始孔隙压力为 10.0 MPa, 初始孔隙比为 0.1, 渗透系数为 0.1 m/d, 并假设模型的初始饱和度为 1.0, 亦即模型的孔隙完全充满液体。

水力压裂计算模拟中施加的注入压力为 40.0 MPa, 压裂液黏性系数为  $300.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 排量为  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 。同时, 渗流场孔隙压力分布采用稳态渗流方法计算。

影响裂缝扩展的主要因素有储层地应力分布、初始孔隙压力、压裂液黏性以及储层力学性质如弹性模量、断裂强度等。由于影响裂缝扩展的因素较多, 本文只就一些主要影响因素进行定量分析, 即在其他因素不变的情况下, 改变其中一种因素, 利用图 1 所建立的模型模拟不同参数对裂缝扩展的影响, 并分析其变化趋势。

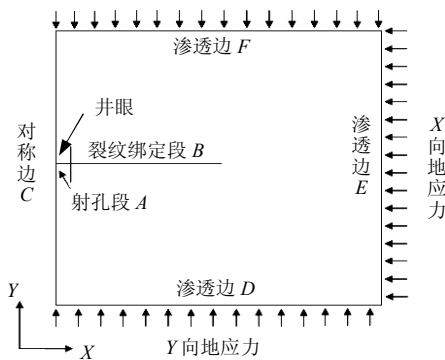


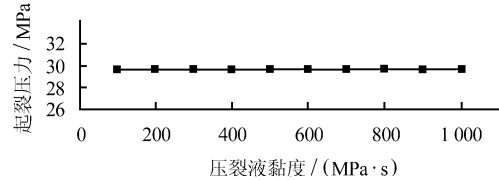
图 1 计算模型示意图

Fig.1 Sketch of the physical model

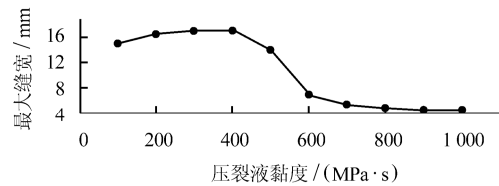
图 2 为不同压裂液黏性下计算得到的裂缝参数值。由图可知, 压裂液黏性对裂缝起裂压力没有影响, 这是因为在裂缝起裂之前仅在射孔段上作用有常渗透压。当压裂液黏度小于  $400.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  时, 最大缝宽随着压裂液黏度的增加而逐步增大, 但最大缝宽的增大率随压裂液黏度的增加逐渐降低, 并在  $400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  处达到最大缝宽; 当压裂液黏度大于  $400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  以后, 由于压裂液黏度过大, 压裂液不但不再起增宽的作用, 反而导致最大缝宽迅速降低, 且当压裂液黏度大于  $800.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  时裂缝变得过于狭窄, 压裂液根本无法进入裂缝, 可见在一定范围内增大压裂液黏度有利于造缝宽, 但一旦压裂液黏度过大, 缝宽则将受到抑制。由图 2 的裂缝长度曲线还可以看到, 裂缝长度随压裂液黏性增加而呈近乎线性比例的关系递减。

图 3 为最大缝宽与缝长的关系曲线。由图可知, 当裂缝长度小于 21.0 m 时, 最大缝宽随缝长增

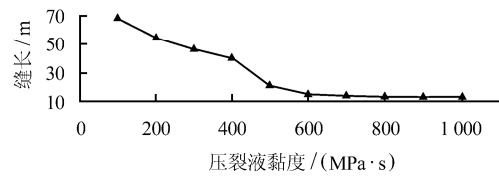
大而线性增加; 当缝长大于 21.0 m 并且小于 40.0 m 时, 最大缝宽随缝长的增加率逐渐放缓, 并在 40.0 m 处达到最大缝宽; 当裂缝长度大于 40.0 m 时, 最大缝宽随缝长增加而逐渐减小。



(a) 起裂压力与压力液黏度曲线



(b) 最大缝宽与压力液黏度曲线



(c) 缝长与压力液黏度曲线

图 2 压裂液黏性对裂缝扩展的影响

Fig.2 Influence of fracturing fluid viscosity on fracture propagation

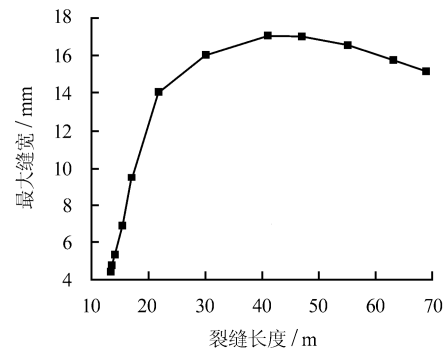


图 3 不同压裂液黏度条件下最大缝宽与缝长关系图

Fig.3 Relationship of between maximal fracture width and fracture length under different fracturing fluid viscosity conditions

在其他因素不变的情况下分别只改变最大水平地应力和最小水平地应力, 不同地应力对裂缝扩展的影响结果如图 4 所示。由图可知, 不同最大水平地应力条件下的起裂压力、最大缝宽和裂缝扩展长度等几乎都完全相等, 可见最大水平地应力对裂缝扩展无影响。起裂压力曲线显示, 起裂压力与最小水平地应力成线性递增的关系, 即最小水平地应

力越大, 则相应的起裂压力也随之增大。最小水平地应力对最大缝宽和缝长的影响可分为 3 个阶段, 当最小水平地应力小于 11.25 MPa 时, 最大缝宽和缝长与最小水平地应力成线性反比关系; 当最小水平地应力由 11.25 MPa 增大到 11.50 MPa 时, 最大缝宽和缝长有个突变过程, 即最大缝宽和缝长都急剧减小; 当最小水平地应力大于 12.0 MPa 时, 最大缝宽和缝长与最小水平地应力又变成线性反比关系, 只曲线的形状变得相当平缓。根据文献[9]得到的结果, 在曲线突变阶段裂缝恰好由起导流作用的裂缝通道转变成起渗透作用的孔隙通道, 此时临界缝宽为 4.0 mm。

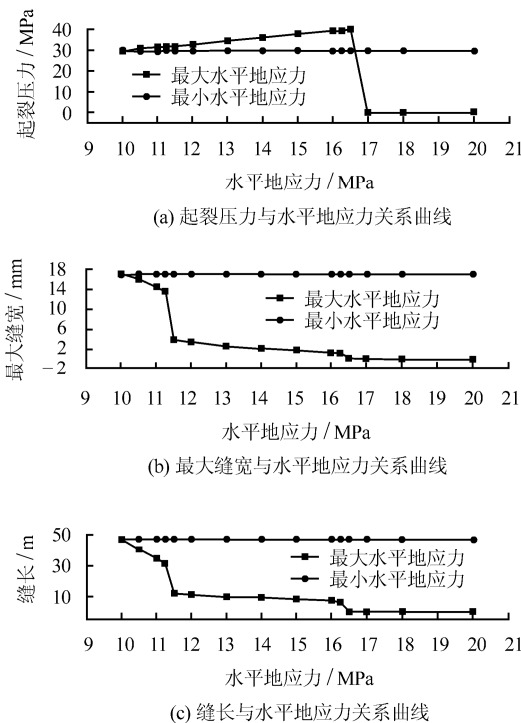


图 4 地应力对裂缝扩展的影响

Fig.4 Influence of in-situ stress on fracture growth

为了比较不同最小水平地应力条件下最大缝宽与缝长之间的关系, 提取图 4 (b) 的最大缝宽和图 4 (c) 的缝长, 形成如图 5 所示的不同最小水平地应力条件下最大缝宽与缝长之间的关系。由图可以看出, 不同地应力条件条件下最大缝宽与缝长成非线性关系。相应的, 该曲线也可分为 3 个阶段: 当缝长小于 8.0 m 时, 缝宽随缝长的增加速度较慢; 缝长从 8.0 扩展到 30.0 m 之间时, 最大缝宽随缝长的增加速度最快; 当缝长大于 30.0 m 时, 最大缝宽增加速度又较前一阶段略为放缓。

临界应力作为裂缝扩展准则中的重要参数, 对裂缝扩展具有重要的影响。图 6 给出了临界应力对

裂缝扩展的影响, 可以看出起裂压力随裂缝临界应力的增大而增加, 但增加幅度小于临界应力的增加值。例如, 当临界应力为 4.0 MPa (图 6(a)) 时, 起裂压力为 28.3 MPa。然而, 当临界应力为 8.0 MPa 时, 起裂压力仅增加到 30.5 MPa, 这是因为渗流场中渗透压力梯度增大而产生的有效应力使裂尖发生应力集中现象, 且应力集中的增幅远大于渗透压力的增加。另外, 从图 6(b) 还可以看出, 临界应力对最大缝宽的影响范围不超过 0.1 mm, 对裂缝扩展长度的影响范围不超过 0.4 m, 表明临界应力只对裂缝起裂压力有影响, 而对最大缝宽和裂缝扩展长度毫无影响。

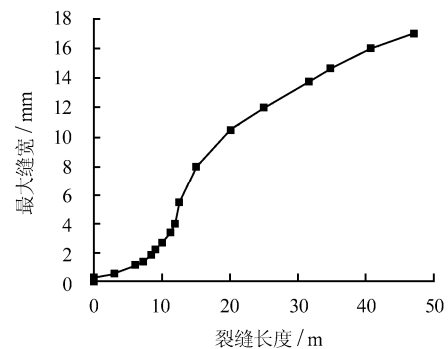


图 5 不同最小水平地应力条件下最大缝宽与缝长关系  
Fig.5 Relationship between maximal fracture width and fracture length under different minimal horizontal in-situ stress conditions

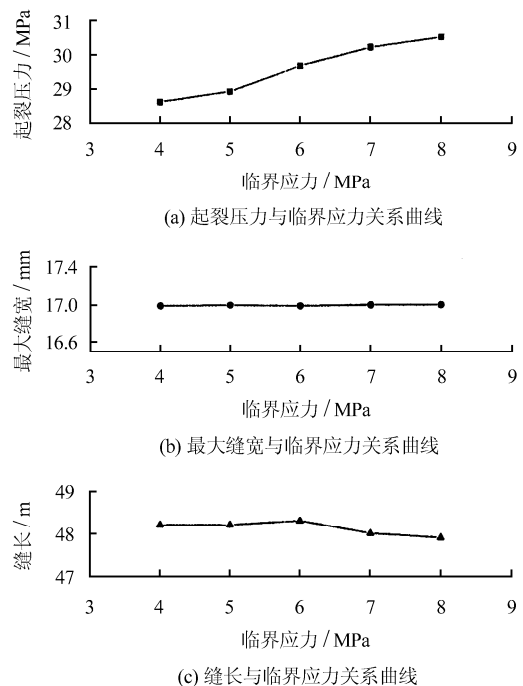


图 6 临界应力对裂缝扩展的影响

Fig.6 Influence of critical stress on fracture propagation

图 7 为弹性模量对裂缝扩展的影响。显然, 起裂压力不随弹性模量的增大而改变, 故可认为起裂压力与弹性模量大小无关。岩层弹性模量对裂缝扩展的影响基本上满足线性反比的关系, 即最大缝宽和裂缝扩展长度随弹性模量的增大而递减。

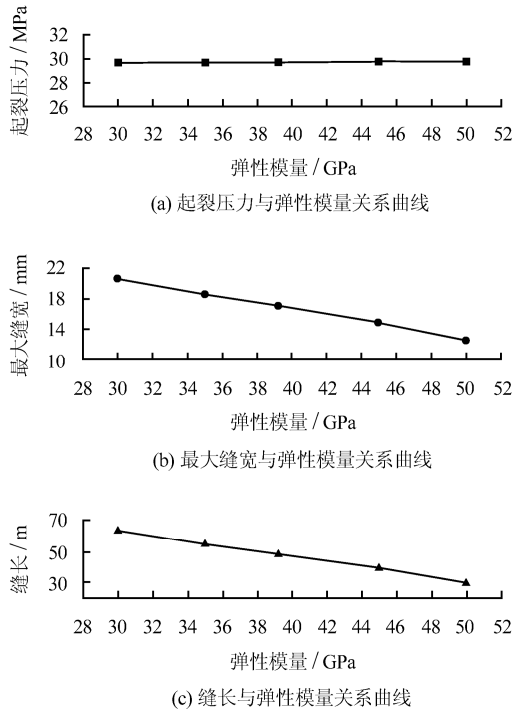


图 7 弹性模量对裂缝扩展的影响

Fig.7 Influence of elastic modules on fracture propagation

初始孔隙压力对裂缝扩展的影响与最小水平地应力相似。起裂压力随初始孔隙压力的增大而增加, 它们的关系如图 8(a)的起裂压力曲线所示, 成线性正比递增关系。最大缝宽和缝长与初始孔隙压力的关系如图 8(b)和图 8(c)最大缝宽曲线和缝长曲线所示, 成 2 阶段线性反比关系。当初始孔隙压力由 12.25 MPa 增加到 12.50 MPa 时, 最大缝宽和缝长都急剧减小, 曲线出现了明显的阶越突变, 突变是裂缝由裂缝通道转变成渗流通道造成的。比较图 4 和图 8 可以发现, 图 4 中裂缝突变阶段是在最小地应力从 11.25 MPa 增加到 11.50 MPa 时发生, 而图 8 中裂缝突变则是当初始孔隙压力从 12.25 MPa 增加到 12.50 MPa 时发生, 二者相差 1.0 MPa。

为了比较不同初始孔隙压力条件下最大缝宽与缝长之间的关系, 提取图 8(b)的最大缝宽和图 8(c)的缝长, 形成如图 9 所示的不同初始孔隙压力条件下最大缝宽与缝长之间的关系图, 由图可见二者成近似抛物线关系。

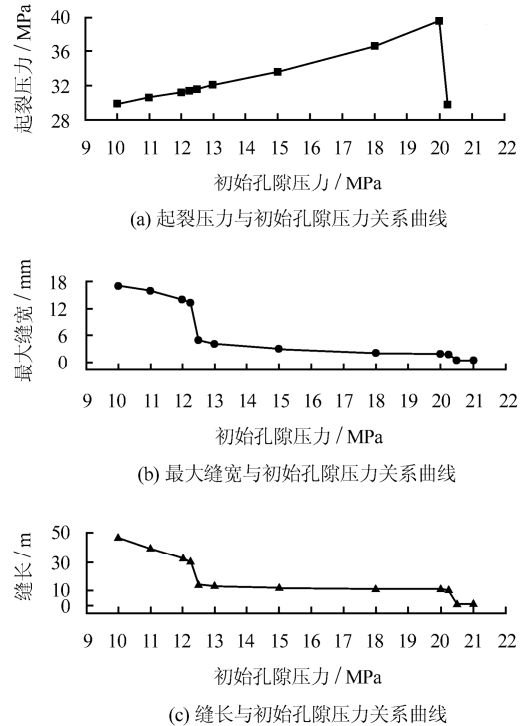


图 8 初始孔隙压力对裂缝扩展的影响

Fig.8 Influence of initial pore pressure on fracture propagation

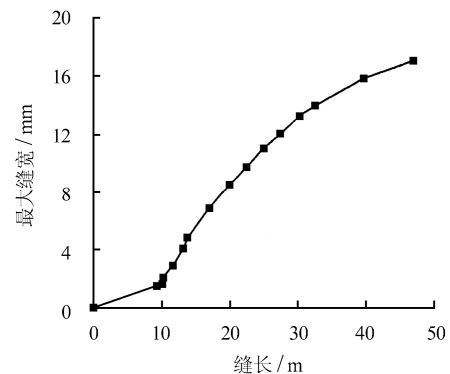


图 9 不同初始孔隙压力条件下最大缝宽与缝长关系图

Fig.9 Relationship between maximal fracture width and fracture length under different initial pore pressure conditions

水力压裂的过程实际是瞬态渗流过程。人们更关心一定压裂作业时间下裂缝的扩展长度, 为此采用瞬态渗流计算方法对图 1 所建模型进行模拟, 其中注入压力的作业曲线如图 10 所示, 注入压力在 5 min 内由 10.0 MPa 增加到 40.0 MPa, 然后维持 40.0 MPa 的注入压力不变, 并持续 1 h。

缝长随作业时间的变化规律如图 11 所示。缝长的变化可分为 4 个阶段, 即无扩展阶段、快速扩展阶段、稳定扩展阶段以及缓慢扩展阶段。由图 11 可知, 当压裂作业时间小于 0.05 h 时, 裂缝处于加

压阶段,此时裂缝无法开裂,亦即处于无扩展阶段;当作业时间从 0.05 h 延续到 0.1 h,随着注入压力加大,裂缝开始起裂,并迅速扩展约 12.0 m,这个阶段可称为快速增长阶段;当作业时间从 0.1 h 持续到 0.4 h 时,裂缝进入稳定扩展阶段,裂缝长度延伸为 31.0 m,此后裂缝进入缓慢增长阶段,扩展 8.0 m 花费了近 0.6 h。实际中作业时间越长压裂成本越高,根据图 11 可知,裂缝扩展长度并不与作业时间成正比,因而图 11 对于现场水力压裂作业具有重要的指导意义。

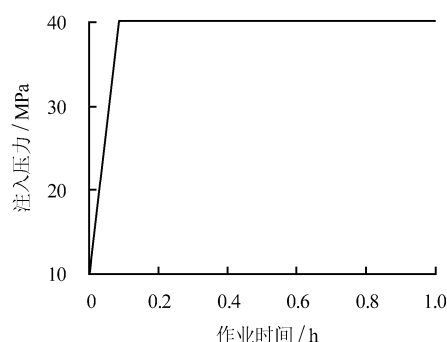


图 10 水力压裂作业图

Fig.10 Treatment of hydraulic fracturing

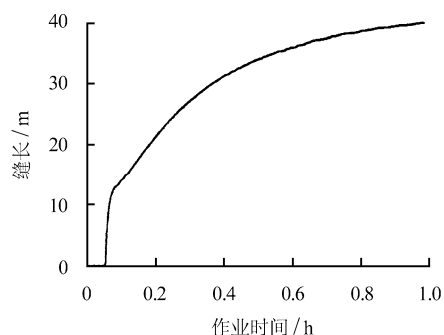


图 11 裂缝长度扩展过程

Fig.11 Evolvement of fracture length propagation

## 4 结 论

本文研究了不同水力压裂参数对裂缝扩展的影响,通过计算分析得到如下结论:

(1) 注入压力一定时,起裂压力与最小水平地应力、临界应力、初始孔隙压力成正比,而与压裂液黏度、最大水平地应力、弹性模量无关。

(2) 注入压力不变的情况下,裂缝扩展长度和最大缝宽与最小水平地应力、初始孔隙压力、弹性模量成反比,而与最大水平地应力无关;

(3) 最大缝宽随着压裂液黏度的增加而逐步增大,但如果压裂液黏度过大,则会抑制最大缝宽增加。

(4) 水力压裂作业中,缝长的扩展过程可分为无扩展、快速扩展、稳定扩展以及缓慢扩展等 4 个阶段。

## 参 考 文 献

- [1] JACQUES H, BRIAN D. Weatherill: Modeling the propagation of waterflood-induced hydraulic fractures[C]//SPE(Society of Petroleum Engineers). American: [s. n.], 1980.
- [2] ANTONIN Settari, MICHAEL P. Cleary: Development and testing of a pseudo-three-dimensional model of hydraulic fracture geometry[C]//SPE(Society of Petroleum Engineers). American: [s. n.], 1986.
- [3] RAHIM Z, HOLDITCH S A. Using a three-dimensional concept in a two-dimensional model to predict accurate hydraulic fracture dimensions[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1995, (13): 15—27.
- [4] ZILLUR R, HOLDITCH S A. The effects of mechanical properties and selection of completion interval upon the created and propped fracture dimension in layered reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1995, (13): 29—45.
- [5] 姜瑞忠, 蒋廷学, 汪永利. 水力压裂技术的近期发展及展望[J]. *石油钻采工艺*, 2004, 26(4): 52—56  
JIANG Rui-zhong, JIANG Ting-xue, WANG Yong-li. Present development and prospecting of hydraulic fracturing technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2004, 26(4): 52—56.
- [6] 张景和, 孙宗硕. 地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [7] 夏惠芬, 李福军, 邸建英. 垂直裂缝几何形态数值模拟及影响因素分析[J]. *钻采工艺*, 1996, 19(2): 25—29
- [8] 张平, 赵金洲, 郭大立, 等. 水力压裂裂缝三维延伸数值模拟研究[J]. *石油钻采工艺*, 1997, 19(34): 53—59  
ZHANG Ping, ZHAO Jin-zhou, GUO Da-li. Study on numerical simulation for 3-Dimensional fracture propagation in hydraulic fracturing[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1997, 19(34): 53—59
- [9] LIAN Z L, WANG X X, WU H A, et al. Modeling and simulation of hydraulic fracturing propagation in permeable reservoirs[C]//Key Engineering Materials Vols 324-325. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2006: 383—386
- [10] HIBBITT, KARLSSON, SORENSE. Help document system of ABAQUS Theory Manual (Version 6.5)[M]. USA: [s. n.], 2005.
- [11] HIBBITT, KARLSSON, SORENSE. Help document system of ABAQUS Analysis User's Manual[Z]. Version 6.5. USA: [s. n.], 2005.
- [12] MICHAEL J. ECONOMIDES, KENNETH G. Nolte: Reservoir stimulation[M](Third edition). American: John Wiley & Sons Publish., 2000: 5—15
- [13] 连志龙, 张劲, 吴恒安, 等. 水力压裂扩展的流固耦合数值模拟[J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 3021—3027.  
LIAN Zhi-long, ZHANG Jin, WU Heng-an, et al. A simulation study on hydraulic fracturing propagation with a solid-fluid coupling model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 3021—3027.

