

# 考虑爆燃气体滤失和多裂缝的复合射孔 裂缝扩展动态模拟

罗伟<sup>1</sup>,李海涛<sup>1</sup>,栗超<sup>2</sup>,何明辉<sup>3</sup>,阳明君<sup>1</sup>,刘涛<sup>1</sup>,黄诚<sup>1</sup>

(1.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500; 2.中国石油川庆钻探工程公司 地质勘探开发研究院,四川 成都 610051; 3.中国石油长庆油田公司 第二采油厂,甘肃 庆阳 745100)

**摘要:**裂缝几何尺寸参数的准确预测是复合射孔优化设计和增产增注效果评价的前提条件,在复合射孔实施过程中,爆燃气体滤失和多裂缝会对裂缝扩展形态产生影响。在分析中外爆燃气体驱动裂缝扩展数学模型的基础上,结合流体力学、弹性力学和线弹性断裂力学理论,建立了全面考虑爆燃气体滤失和多裂缝的复合射孔裂缝扩展数学模型,通过假设与多个变量相关的裂缝内爆燃气体压力分布函数,利用迭代法实现了模型的数值耦合求解,获得了裂缝几何尺寸随时间的动态变化规律。实例计算结果表明:地层渗透率和裂缝条数对复合射孔裂缝扩展形态影响很大,缝长随地层渗透率和裂缝条数的增加而减小;不考虑爆燃气体滤失和多裂缝导致计算得到的缝长偏大,且相对误差随地层渗透率和裂缝条数的增大而增大。

**关键词:**复合射孔 爆燃气体 滤失 多裂缝 裂缝扩展 动态模拟

**中图分类号:** TE357.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)04-0102-03

复合射孔是将射孔与高能气体压裂相结合,旨在提高油气井井底完善程度的一种完井技术。其基本原理是将带有射孔弹和推进剂的弹架装入有泄压孔的射孔枪内,利用油管或电缆将射孔装置下到目的层位,通过投棒或电引爆射孔器,将射孔弹引爆后形成射流穿透套管,在地层中形成孔眼,推进剂随之燃烧产生大量的高温高压气体,这样在射孔的同时对地层进行高能气体压裂,使其在地层中形成孔缝结合的多裂缝体系<sup>[1-5]</sup>。目前,国外学者 Nilson 等<sup>[6-7]</sup>和中国学者蒲春生等<sup>[8-10]</sup>分别提出了爆燃气体驱动的裂缝扩展模型,但这些模型均未同时考虑爆燃气体滤失和多裂缝对裂缝扩展形态的影响。为此,笔者在上述模型的基础上,全面考虑了爆燃气体滤失和多裂缝对裂缝扩展形态的影响,运用流体力学、弹性力学和线弹性断裂力学理论,建立了复合射孔裂缝扩展数学模型,并通过数值求解方法<sup>[11]</sup>和计算机编程进行了实例计算。

## 1 裂缝扩展数学模型

建立模型时假设如下:①地层各向均质同性;②非弹性响应仅限于在裂缝尖端很小的区域;③在

裂缝中流动的流体是等温流体;④形成的裂缝为高度恒定的楔形径向裂缝。

### 1.1 裂缝内爆燃气体的流动方程

爆燃气体在裂缝内流动的连续性方程和动量守恒方程分别为

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} = -2\rho v \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho w u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u^2)}{\partial x} = -\rho w \left( \frac{\partial p}{\rho \partial x} + f_g \right) \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为裂缝内爆燃气体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $w$  为缝宽,  $\text{m}$ ;  $t$  为裂缝扩展时间,  $\text{s}$ ;  $u$  为裂缝内爆燃气体的流动速度,  $\text{m/s}$ ;  $x$  为裂缝内任意位置距裂缝起裂点的距离,  $\text{m}$ ;  $v$  为裂缝内爆燃气体的滤失速度,  $\text{m/s}$ ;  $p$  为裂缝内爆燃气体压力,  $\text{MPa}$ ;  $f_g$  为裂缝壁对爆燃气体的摩阻系数。

### 1.2 裂缝内爆燃气体的滤失速度方程

根据卡特滤失公式和一维达西流动分析,裂缝内爆燃气体的滤失速度的计算式为

$$v = \frac{p - p_r}{\sqrt{t - \tau}} \sqrt{\frac{\beta K \phi}{\pi \mu}} \quad (3)$$

式中:  $p_r$  为地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $\tau$  为爆燃气体到达裂缝任意位置处的时间,  $\text{s}$ ;  $\beta$  为爆燃气体压缩系

收稿日期:2013-05-13。

作者简介:罗伟,男,在读博士研究生,从事油气田开发与完井方面的研究。联系电话:13547852238, E-mail:lwsipu@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“低渗气藏水平井分段压裂及控水完井技术研究”(2011ZX05022-006-004HZ)。

数,  $\text{MPa}^{-1}$ , 对于理想气体, 其值为  $1/p$ ;  $K$  为地层渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\phi$  为地层孔隙度;  $\mu$  为裂缝内爆燃气体粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

### 1.3 裂缝结构方程

根据弹性力学理论, 裂缝内任意位置处缝宽的计算式为

$$w(\theta) = \frac{4(1-\gamma)L}{\pi G} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{[p(\theta_1) - \sigma] f\left(\theta, \frac{L}{r_w}\right) d\theta_1}{\sqrt{\theta_2^2 - \theta_1^2}} \times \frac{\theta_2 f\left(\theta, \frac{L}{r_w}\right) d\theta_2}{\sqrt{\theta_2^2 - \theta^2}} \quad (4)$$

其中

$$\theta = \frac{x}{L} \quad (5)$$

$$f\left(\theta, \frac{L}{r_w}\right) = 1 + 0.3(1-\theta)\left(1 + \frac{L}{r_w}\right)^{-2} \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  为泊松比;  $L$  为缝长,  $\text{m}$ ;  $G$  为岩石剪切模量,  $\text{MPa}$ ;  $\theta_1$  和  $\theta_2$  为裂缝内不同位置处的相对位置;  $\sigma$  为地层最小主应力,  $\text{MPa}$ ;  $f(\theta, L/r_w)$  为与裂缝和井筒形状相关的权函数;  $r_w$  为井筒半径,  $\text{m}$ 。

根据线弹性断裂力学理论, 当裂缝尖端应力强度因子大于裂缝断裂韧性时, 裂缝开始扩展, 即有

$$\int_0^1 [p(\theta) - \sigma] f\left(\theta, \frac{L}{r_w}\right) \frac{d\theta}{\sqrt{1-\theta^2}} = \frac{K_c}{2} \sqrt{\frac{\pi}{L}} \quad (7)$$

式中:  $K_c$  为裂缝断裂韧性,  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

与直井水力压裂产生双翼裂缝不同的是, 复合射孔在近井地带通常会产生 3~5 条裂缝, 多裂缝对缝宽和裂缝尖端应力强度因子的影响可以引入 1 个与裂缝条数相关的权函数来表示, 其表达式为

$$f_N = \frac{f_\infty + f_\infty \frac{LN}{\pi r_w}}{f_\infty + \frac{LN}{\pi r_w}} \quad (8)$$

式中:  $f_N$  为与裂缝条数相关的权函数;  $f_\infty$  为与裂缝条数相关的变量;  $N$  为裂缝条数。

对于缝宽和裂缝尖端应力强度因子,  $f_\infty$  的表达式可分别表示为

$$f_\infty = 1 + \frac{\pi}{2} \left( \frac{2\sqrt{N-1}}{N} - 1 \right) \sqrt{1-\theta^2} \quad (9)$$

$$f_\infty = \left( 1 + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{\frac{N-1}{N}} \quad (10)$$

## 2 模型求解

### 2.1 裂缝内爆燃气体压力分布函数假设

参考 Nilson 对爆燃气体在裂缝内压力分布的研

究成果<sup>[6]</sup>, 将裂缝内爆燃气体压力分布函数表示为

$$\frac{p(\theta, t) - p(\theta^*, t)}{p(0, t) - p(\theta^*, t)} = \left[ 1 - \frac{\theta}{\theta^*(t)} \right]^m \quad (11)$$

式中:  $p(\theta, t)$  为  $t$  时刻裂缝内  $\theta$  处的爆燃气体压力,  $\text{MPa}$ ;  $p(\theta^*, t)$  为  $t$  时刻裂缝流动尖端  $\theta^*$  处的爆燃气体压力,  $\text{MPa}$ ;  $p(0, t)$  为  $t$  时刻裂缝入口处的爆燃气体压力,  $\text{MPa}$ ;  $\theta^*(t)$  为  $t$  时刻裂缝流动尖端的相对位置;  $m$  为裂缝内爆燃气体压力分布指数。

在裂缝扩展过程中, 裂缝内爆燃气体压力分布存在 2 种情况(图 1): I 为裂缝流动尖端与裂缝尖端重合(全部穿入), 即  $\theta^*(t) = 1$ ,  $0 \leq p^*(1, t) < 1$ ; II 为裂缝流动尖端与裂缝尖端不重合(部分穿入), 即  $0 < \theta^*(t) < 1$ ,  $p^*(\theta^*, t) = 0$ 。

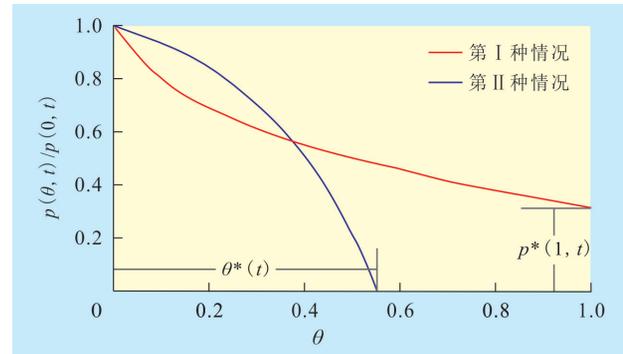


图1 裂缝内爆燃气体压力分布

### 2.2 求解方法

根据边界条件和初始条件, 在离散的时间域内利用迭代法对所建模型进行求解, 可以得到裂缝扩展过程中不同时刻的缝长和缝宽。在求解过程中, 首先判断裂缝内爆燃气体压力分布情况, 设定  $p^*(1, t)$  或  $\theta^*(t)$  的初值, 通过式(7)和式(11)计算得到裂缝内爆燃气体的压力分布指数; 然后通过式(1)~式(4)计算裂缝延伸速度、裂缝内任意位置处爆燃气体的流动速度、滤失速度和缝宽; 再用式(1)作为判定条件, 判断该时刻爆燃气体在裂缝内的流动是否满足质量守恒方程; 如果满足, 则进行下一时刻计算, 如果不满足, 继续进行迭代求解。

## 3 实例计算与分析

基于所建裂缝扩展数学模型的数值求解方法, 编制相应求解程序, 进行实例计算。输入的基本数据包括: 岩石的杨氏模量为  $20.3 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.25$ , 裂缝断裂韧性为  $0.549 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 裂缝壁表面粗糙度为  $0.0001 \text{ m}$ , 地层最小主应力为  $24 \text{ MPa}$ , 地

层压力为28 MPa,地层孔隙度为0.17,地层渗透率分别为 $0, 10 \times 10^{-3}, 50 \times 10^{-3}$ 和 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,裂缝条数分别为2,3,4和5,井筒半径为0.108 m,爆燃气体粘度为 $2.2 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,裂缝初始长度为0.36 m。另外,不同时刻的井筒压力(图2)也是进行实例计算需要输入的基本数据。

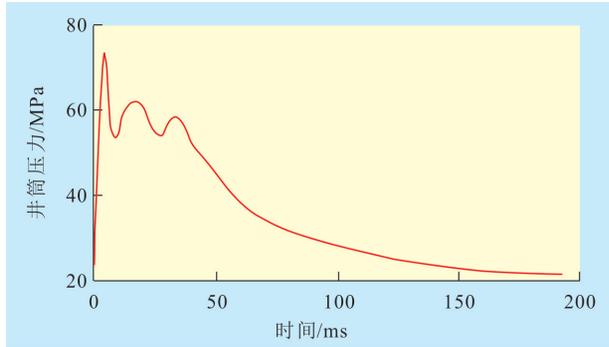


图2 井筒压力随时间的变化

由不同地层渗透率下缝长随时间的变化(图3)可见,缝长随地层渗透率的增大而减小。这是因为地层渗透率越大,爆燃气体在地层中的滤失量也越大,最终导致裂缝延伸速度和缝长减小。以地层渗透率为0时的缝长为基准,对比不同地层渗透率下是否考虑爆燃气体滤失而引起的裂缝扩展误差(表1)发现,不考虑爆燃气体滤失,会使计算得到的缝长偏大,且相对误差随地层渗透率的增大而增大。

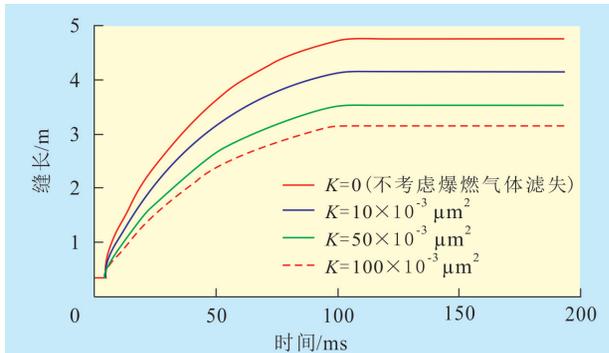


图3 不同地层渗透率下缝长随时间的变化

表1 不同地层渗透率下爆燃气体滤失引起的裂缝扩展结果对比

地层渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	缝 长 / m		相对误差, %
	不考虑爆燃 气体滤失	考虑爆燃 气体滤失	
10	4.751 9	4.150 3	12.65
50	4.751 9	3.539 3	25.51
100	4.751 9	3.154 2	33.62

分析不同裂缝条数下缝长随时间的变化(图4)可知,裂缝条数越多,缝长越小,所有裂缝的总长度也相应减小,这主要是因为裂缝条数的增加,将导

致裂缝间的干扰增强和爆燃气体滤失的影响增大。对比不同裂缝条数下考虑多裂缝计算得到的缝长与假定裂缝条数为2时的缝长(表2)可见,不考虑多裂缝时,计算得到的缝长偏大,且相对误差随裂缝条数的增多而增大。

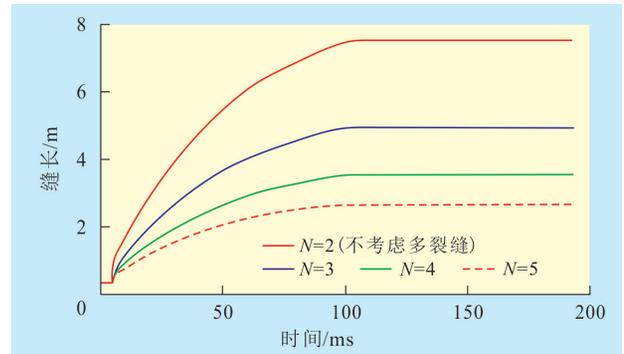


图4 不同裂缝条数下缝长随时间的变化

表2 不同裂缝条数下多裂缝引起的裂缝扩展结果对比

裂缝数/条	缝 长 / m		相对误差, %
	不考虑多裂缝	考虑多裂缝	
3	7.521 3	4.943 3	34.27
4	7.521 3	3.539 3	52.94
5	7.521 3	2.662 9	64.59

### 4 结论

基于流体力学、弹性力学和线弹性断裂力学理论建立了综合考虑爆燃气体滤失和多裂缝的复合射孔裂缝扩展数学模型,并提出了模型的求解方法,该模型适用范围更广,裂缝几何尺寸参数预测结果更加符合实际。

实例分析结果表明,地层渗透率和裂缝条数对复合射孔裂缝扩展影响很大,缝长随地层渗透率和裂缝条数的增加而减小;不考虑爆燃气体滤失和多裂缝导致计算得到的缝长偏大,且相对误差随地层渗透率和裂缝条数的增大而增大。

#### 参考文献:

- [1] 朱建新,张凡文.双复射孔器在胜利油区中低渗透油藏中的应用[J].油气地质与采收率,2004,11(4):71-72.
- [2] 李克明,张曦.高能复合射孔技术与应用[J].石油勘探与开发,2002,29(5):91-92.
- [3] 李宗田,李凤霞,黄志文.水力压裂在油气田勘探开发中的关键作用[J].油气地质与采收率,2010,17(5):76-79.
- [4] 孙新波,刘辉,王宝兴,等.复合射孔技术综述[J].爆破器材,2007,36(5):29-31.

(下转第110页)