文章编号：1001-1455(2014)03-0307-08

复合射孔爆燃气体压裂裂缝起裂扩展研究*

李海涛[1]，罗 伟[1]，姜雨省[2]，张俊松[3]

(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. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司，天津 300452；
3. 中石化石油工程西南有限公司井下作业分公司，四川 德阳 618000)

摘要：结合线弹性断裂力学的裂缝尖端应力强度因子判据，建立了复合射孔爆燃气体压裂裂缝的起裂扩展模型，通过建立与多个变量相关的缝内气体压力分布函数，利用迭代法实现了模型的数值求解，获得了缝内气体压力分布随时间的动态变化规律，并分析了不同特征参数对裂缝起裂扩展与止裂过程的影响。实例计算结果表明：(1)随着裂缝扩展的进行，爆燃气体流动尖端与裂缝尖端经历了由重合到不重合再到重合的过程；(2)地应力越大，裂缝起裂扩展越困难，爆燃气体有效致裂作用时间越短，最终得到的裂缝扩展长度也越小；(3)初始裂缝越长，裂缝更容易起裂扩展，爆燃气体能量利用率越高，裂缝扩展更长；(4)岩石断裂韧性的改变对裂缝起裂、止裂和裂缝扩展长度没有明显的影响；(5)升压速率越小，爆燃气体有效致裂作用时间越长，最终裂缝扩展也更长，但对裂缝起裂压力与止裂压力几乎没有影响。

关键词：爆炸力学；裂缝起裂扩展；数值耦合求解；复合射孔；缝内气体压力分布；裂缝止裂

中图分类号：O389 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

复合射孔技术的基本原理是通过先引爆射孔弹成孔，推进剂随后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，使其在地层中形成一种孔缝结合的径向多裂缝体系，有效解除地层污染，从而达到增产增注的目的[1-2]。复合射孔优化设计和增产增注效果评价的前提条件是裂缝起裂扩展的准确预测，由于射孔弹炮轰产生的初始裂缝的存在，使复合射孔的裂缝起裂扩展研究不能采用传统的水力压裂裂缝起裂判据[3-4]。目前学者们对爆燃气体压裂裂缝起裂扩展进行了一些研究：R. H. Nilson 等[5-8]、L. Petitjean 等[9]、W. Y. David 等[10]基于准静态理论建立了爆燃气体驱动裂缝扩展模型及其数值求解方法，但并没有对裂缝起裂与止裂过程进行模拟分析；王家来等[11]、杨小林等[12]将损伤力学和断裂力学相结合，建立了裂缝尖端断裂的损伤局部化模型；陈莉静等[13-14]推导了高地应力约束条件下裂缝尖端应力强度因子，得到了裂缝起裂扩展条件，并分析了裂尖动态效应对裂缝起裂扩展的影响；李宁等[15]基于动态接触界面模型用有限元的方法模拟了爆燃气体驱动裂缝起裂扩展过程。国内这些学者的研究都是在假设缝内气体压力分布解析表达式即缝内气体压力分布已知的基础上对裂缝的起裂扩展过程进行分析，但实际上缝内气体压力分布涉及到爆燃气体在缝内的紊流流动、岩石的动态响应及爆燃气体压力的动态变化等多层次耦合求解问题，因而简单地假设缝内气体压力分布得出的模拟结果不能真实地反映实际情况。

本文中，作者在前人研究的基础上，首先运用线弹性断裂力学理论建立裂缝起裂扩展的裂缝尖端应力强度因子判据，然后运用流体力学和弹性力学理论分别建立爆燃气体在裂缝内流动的基本运动微分方程和裂缝宽度控制方程，通过建立与多个变量相关的缝内气体压力分布函数，利用迭代法实现该耦合模型的数值求解，模拟爆燃气体压裂裂缝的起裂扩展与止裂过程，并分析不同特征参数对它的影响，以期为复合射孔优化设计提供参考与理论指导。

* **收稿日期**：2012-11-13；**修回日期**：2013-02-03
基金项目：国家科技重大专项项目(2011ZX05022-006-004HZ)
作者简介：李海涛(1965—)，男，博士，教授，博士生导师。

1 裂缝尖端应力强度因子判据

由断裂力学理论可知,对于一对双翼裂缝,裂缝尖端应力强度因子[16]为

$$K_{\mathrm{I}}=2\sqrt{\frac{L}{\pi}}\int_0^1(p(\theta)-\sigma)f(\theta,L/r_{\mathrm{w}})\frac{\mathrm{d}\theta}{\sqrt{1-\theta^2}} \tag{1}$$

式中:L 为裂缝长度,θ 为裂缝内任意给定处的相对位置,$p(\theta)$为裂缝内 θ 处的气体压力,σ 为地应力,r_{w} 为井筒半径。

其中权函数 $f(\theta,L/r_{\mathrm{w}})$与裂缝几何形状和井筒半径相关:

$$f(\theta,L/r_{\mathrm{w}})=1+0.3(1-\theta)\left(\frac{1}{1+L/r_{\mathrm{w}}}\right)^2 \tag{2}$$

从式(1)可以看出,裂缝尖端应力强度因子与缝内气体压力分布、地应力及裂缝长度有关。

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要产生 3~6 条裂缝,多裂缝对裂缝尖端应力强度因子的影响可以在权函数 $f(\theta,L/r_{\mathrm{w}})$上再引入一个与裂缝条数相关的乘子 f_N,其中 f_N的表达式为

$$f_N=\frac{f_\infty+f_\infty\dfrac{LN}{\pi r_{\mathrm{w}}}}{f_\infty+\dfrac{LN}{\pi r_{\mathrm{w}}}} \tag{3}$$

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

式中:N 为裂缝条数。

根据线弹性断裂力学理论,对于带有裂隙的岩石,判断其是否断裂应该采用 K 判据,即裂缝起裂扩展条件为

$$K_{\mathrm{I}}\geqslant K_{\mathrm{IC}} \tag{5}$$

式中:K_{IC}为岩石断裂韧性,它表征了岩石阻止裂缝起裂扩展的能力,是岩石抵抗脆性破坏能力的一个韧性指标。对于同一种岩石,在一定的条件下,K_{IC}为一个常数。

2 裂缝内气体流动方程与缝宽控制方程

模型建立时作如下假设:

(1)在裂缝扩展过程中地层应力场是稳定的,且地层各向均质同性;

(2)非弹性响应仅限于在裂缝尖端很小的区域内;

(3)裂缝内气体的流动是等温流动,不考虑气体与地层的热交换;

(4)形成的裂缝为高度恒定的楔形径向裂缝。

2.1 裂缝内气体流动方程

爆燃气体在裂缝内流动的连续性方程为

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho wu)}{\partial x}=-2\rho v \tag{6}$$

爆燃气体在裂缝内流动的动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho wu)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho wu^2)}{\partial x}=-\rho w\left(\frac{\partial p}{\rho\partial x}+\lambda\right) \tag{7}$$

式中:ρ 为裂缝内气体密度,w 为裂缝宽度,u 为裂缝内气体的流动速度,v 为裂缝内气体的侧向渗滤速度,p 为裂缝内气体压力,λ 为裂缝壁对气体的摩阻系数。

式(7)左边部分代表了爆燃气体在裂缝内流动的惯性作用,因爆燃气体驱动裂缝扩展被视为一个准静态过程,因此在实际分析过程中惯性作用可以忽略,这样式(7)就变成了爆燃气体沿裂缝的压力梯度

与摩擦力之间的一个平衡方程。

爆燃气体在裂缝内的流动为紊流流动，其摩阻系数

$$\lambda = a\left[\frac{\varepsilon}{w}\right]^{b}\frac{u^{2}}{w} \tag{8}$$

式中：ε 为裂缝表面粗糙度，$a=0.1$，$b=0.5$。

裂缝内爆燃气体的侧向渗滤速度

$$v = \frac{p - p_{r}}{\sqrt{t-\tau}}\left[\frac{\beta k\phi}{\pi\mu}\right]^{0.5} \tag{9}$$

式中：p_r 为地层压力，k 为地层渗透率，ϕ 为地层孔隙度，μ 为裂缝内气体黏度，β 为气体压缩系数，t 为裂缝扩展时间，τ 为爆燃气体到达裂缝任意位置处的时间。

可压缩气体的状态方程为

$$\rho = \frac{M_{g}p}{RTZ} \tag{10}$$

式中：R 为摩尔气体常数，T 为气体温度，M_g 为气体相对分子质量，Z 为气体偏差系数。

2.2　缝宽控制方程

根据弹性力学理论，裂缝内任意给定处的缝宽为

$$w(\theta) = \frac{4(1-\nu)L}{\pi G}\int_{\theta}^{1}\int_{0}^{\theta_2}\frac{(p(\theta_1)-\sigma)f(\theta,L/r_{w})\mathrm{d}\theta_1}{\sqrt{\theta_2^{2}-\theta_1^{2}}}\frac{\theta_2 f(\theta,L/r_{w})\mathrm{d}\theta_2}{\sqrt{\theta_2^{2}-\theta^{2}}} \tag{11}$$

式中：ν 为泊松比，G 为岩石剪切模量，θ_1 和 θ_2 为裂缝内不同处的相对位置。

同样多裂缝对缝宽的影响也在权函数 $f(\theta,L/r_w)$ 上再引入乘子 f_N，其中 f_N 的表达式不变，f_∞ 变为

$$f_{\infty} = 1 + \frac{\pi}{2}\left(\frac{2\sqrt{N-1}}{N} - 1\right)\sqrt{1-\theta^{2}} \tag{12}$$

3　裂缝起裂扩展数值求解

3.1　缝内气体压力分布函数

根据爆燃气体在裂缝不同位置处的衰减特点[8]，将缝内气体压力分布函数 $p(\theta,t)$ 表示为：

$$\frac{p(\theta,t)-p(\theta'',t)}{p(0,t)-p(\theta'',t)} = \ln\left[\mathrm{e} - \frac{\theta^{m}}{\theta''(t)^{m}}(\mathrm{e}-1)\right] \qquad 0 \leqslant \theta \leqslant \theta''(t) \tag{13}$$

式中：$p(\theta,t)$ 为 t 时刻裂缝内 θ 处的气体压力，$\theta''(t)$ 为 t 时刻爆燃气体流动尖端的相对位置，$p(\theta'',t)$ 为 t 时刻爆燃气体流动尖端 θ'' 处的气体压力，$p(0,t)$ 为 t 时刻裂缝入口处的气体压力，m 为缝内气体压力分布指数。

在实际裂缝扩展过程中缝内气体压力分布会出现 2 种不同的情况（见图 1）：(1)爆燃气体流动尖端和裂缝尖端重合（全部穿入），即 $\theta''(t)=1$，$0 \leqslant p''(1,t) < 1$；(2)爆燃气体流动尖端和裂缝尖端不重合（部分穿入），即 $0 < \theta''(t) < 1$，$p''(\theta'',t)=0$。

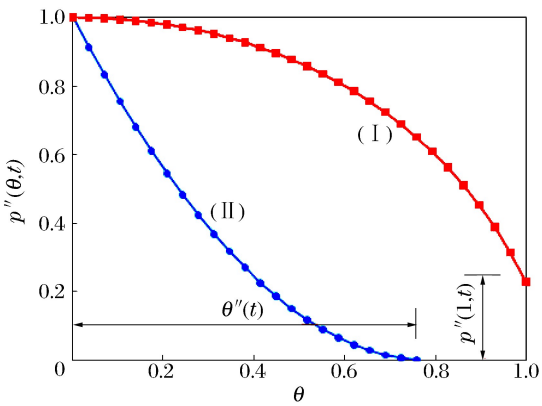


图 1　缝内气体压力分布的 2 种情况

Fig. 1　Gas pressure distribution in fracture of two different types

3.2　求解方法

由式(13)可知，缝内气体压力分布函数与多个变量相关，该裂缝起裂扩展模型无法直接求解，本文中采用迭代法并结合实际的边界条件和初始条件在离散的时间域内（从推进剂燃烧开始）对其进行求

解。具体方法如下：

(1)根据建立的缝内气体压力分布函数，假设 $p''(1,t)$ 或 $\theta''(t)$ 的初值；

(2)通过裂缝尖端应力强度因子判据计算得到缝内气体压力分布指数 m；

(3)由式(11)、(10)、(7)、(9)和(6)在裂缝尖端的积分可以计算得到裂缝宽度、缝内气体密度、缝内任意位置处的气体流速、气体侧向滤失速度和裂缝延伸速度；

(4)运用式(6)判断该时刻爆燃气体在整个裂缝内的流动是否满足质量守恒，如果满足，则说明该时刻裂缝开始起裂扩展，如果不满足，改变 $p''(1,t)$ 或 $\theta''(t)$，重复方法(2)～(3)，当 $p''(1,t)\geqslant 1$ 或 $\theta''(t)\leqslant 0$ 时还不满足，说明该时刻裂缝还没有起裂扩展，则进行下一时刻裂缝起裂扩展判断。运用相同的方法可以对裂缝扩展后期的止裂进行判断。

4 实例计算分析

基于所建裂缝起裂扩展模型的数值求解方法，编制相应程序，进行实例计算，并分析不同特征参数对裂缝起裂扩展与止裂过程的影响，有关计算参数为：岩石的杨氏模量为 21.4 GPa，泊松比为 0.23，岩石断裂韧性为 0.5 MPa·$m^{0.5}$，裂缝表面粗糙度为 0.1 mm，地应力为 25 MPa，地层压力为 28 MPa，地层孔隙度为 0.14，地层渗透率为 50 md(0.05 μm^2)，裂缝条数为 4，井筒半径为 0.108 m，气体黏度为 22 μPa·s，裂缝初始长度 $L_0=0.45$ m。图 2 是缝口气体压力和爆燃气体温度随时间的变化曲线，其也是作为实例计算的输入参数。

图 3 显示了缝内气体压力分布随时间的变化情况，从图中可以看出，随着裂缝扩展的进行，爆燃气体流动尖端与裂缝尖端经历了由重合到不重合再到重合的过程。这主要是因为在裂缝扩展前期，由于气体压力不高，裂缝扩展速度不大，爆燃气体流动尖端与裂缝尖端重合，即爆燃气体进入裂尖区域；到裂缝扩展中期，随着气体压力的升高，裂缝扩展速度逐渐变大，爆燃气体的流动速度小于裂缝扩展速度，爆燃气体流动尖端与裂缝尖端不重合，即爆燃气体未进入裂尖区域；再到裂缝扩展后期，气体压力逐渐降低，裂缝扩展速度变缓，爆燃气体流动尖端又与裂缝尖端重合，即爆燃气体又进入裂尖区域。

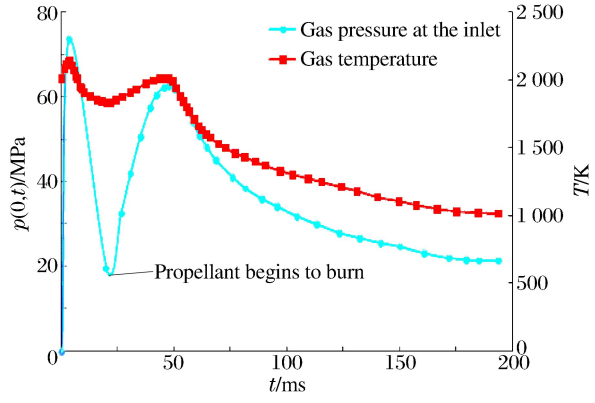


图 2 缝口气体压力与爆燃气体温度随时间的变化

Fig. 2 Gas pressure at the inlet and gas temperature varied with time

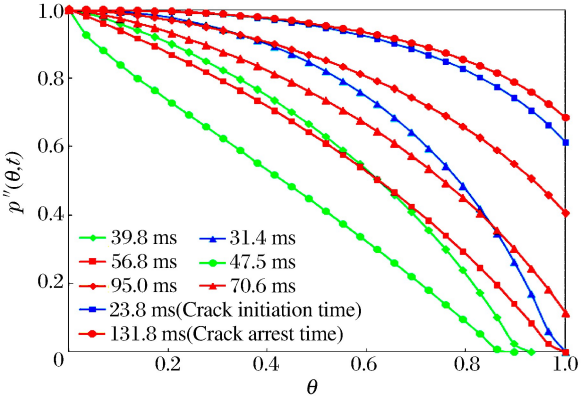


图 3 缝内气体压力分布随时间的变化

Fig. 3 Gas pressure distribution in fracture versus time

4.1 地应力对裂缝起裂扩展和止裂的影响

表 1 和图 4 分别是不同地应力下的裂缝扩展情况和裂缝长度随时间的变化，从表 1 和图 4 可以看出，裂缝起裂压力 p_i 与止裂压力 p_a 随地应力增大而增大。这是因为地应力是裂缝扩展的主要阻力，地应力增大将使裂缝内净压力 $p(\theta)-\sigma$ 减小，裂缝起裂扩展更困难；在缝口气体压力随时间变化曲线相同的条件下，地应力增大，裂缝起裂(起裂时间 t_i)滞后，裂缝止裂(止裂时间 t_a)提前，爆燃气体有效致裂作用时间缩短，即爆燃气体能量利用率降低，最终得到的裂缝扩展长度也减小。所以，有效克服地应力是复合射孔取得良好施工效果的关键。

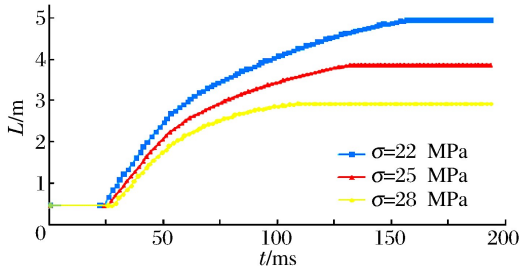


图 4 不同地应力下裂缝长度随时间的变化

Fig. 4 Fracture length versus time for various in-situ stresses

表 1 不同地应力下的裂缝扩展情况

Table 1 Fracture extension under different in-situ stresses

σ/MPa	t_i/ms	p_i/MPa	t_a/ms	p_a/MPa	L/m
22	22.3	24.17	157.2	23.61	4.93
25	23.8	27.22	131.8	26.78	3.85
28	25.4	30.47	112.0	30.22	2.93

4.2 初始裂缝长度对裂缝起裂扩展和止裂的影响

表 2 和图 5 显示了初始裂缝长度对裂缝扩展的影响，从表 2 和图 5 可以看出，裂缝起裂压力与止裂压力随初始裂缝增长而减小。由式(1)可知裂缝尖端应力强度因子与初始裂缝长度成正比，初始裂缝增长会使裂缝尖端应力强度因子增大，裂缝更容易起裂扩展；初始裂缝越长，裂缝起裂提前，裂缝止裂滞后，爆燃气体有效致裂作用时间越长，即爆燃气体能量利用率越高，裂缝扩展更长。因此，提高射孔弹性能使初始裂缝更长，对提高复合射孔施工效果具有重要的意义。

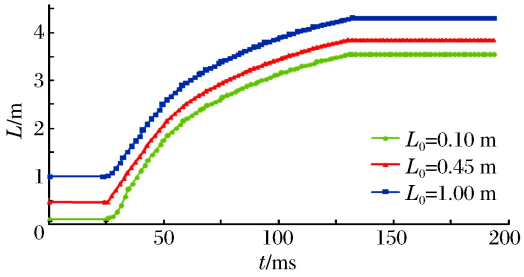


图 5 不同初始裂缝长度下裂缝长度随时间的变化

Fig. 5 Fracture length varied with time for various initial crack lengths

表 2 不同初始裂缝长度下的裂缝扩展情况

Table 2 Fracture extension under different initial crack lengths

L_0/m	t_i/ms	p_i/MPa	t_a/ms	p_a/MPa	L/m
0.10	24.3	28.23	130.3	26.98	3.53
0.45	23.8	27.22	131.8	26.78	3.85
1.00	23.7	27.02	133.5	26.55	4.31

4.3 岩石断裂韧性对裂缝起裂扩展和止裂的影响

表 3 和图 6 分别是不同岩石断裂韧性下的裂缝扩展情况和裂缝长度随时间的变化，从表 3 和图 6 可以看出，岩石断裂韧性的改变对裂缝起裂，止裂和裂缝扩展长度的影响很小。这主要是因为岩石断裂韧性对裂缝扩展的阻力作用相比于较大的地应力是非常小的，一般可以忽略不计。因此，在进行爆燃气体压裂裂缝起裂扩展模拟时，为简化计算，可以将岩石断裂韧性设定为零。

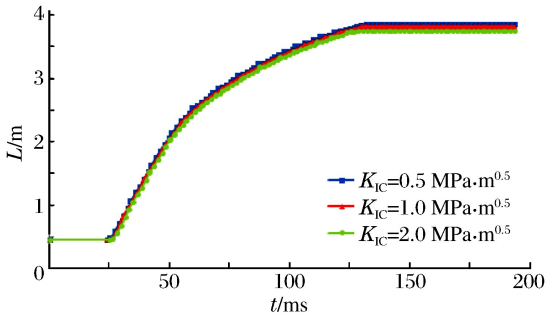


图 6 不同岩石断裂韧性下裂缝长度随时间的变化

Fig. 6 Fracture length with time for various fracture toughnesses

表 3 不同岩石断裂韧性下的裂缝扩展情况

Table 3 Fracture extension under different fracture toughnesses

K_{IC}/(MPa·m$^{0.5}$)	t_i/ms	p_i/MPa	t_a/ms	p_a/MPa	L/m
0.5	23.8	27.22	131.8	26.78	3.85
1.0	24.1	27.83	130.2	26.99	3.82
2.0	24.7	29.05	128.7	27.20	3.76

4.4 升压速率对裂缝起裂扩展和止裂的影响

为了得到升压速率 v_p 对裂缝扩展的影响，首先绘制了不同升压速率下(1.70、1.22、0.92 MPa/ms)缝口气体压力随时间的变化曲线(见图 7)，然后将不同升压速率下的裂缝起裂、止裂和裂缝扩展情况进行了比较，具体结果见表 4 和图 8。

表 4 不同升压速率下的裂缝扩展情况

Table 4 Fracture extension at different rates of pressure rise

v_p/(MPa·ms^{-1})	t_i/ms	p_i/MPa	t_a/ms	p_a/MPa	L/m
1.70	23.8	27.22	131.8	26.78	3.85
1.22	27.5	27.22	161.7	26.65	4.39
0.92	31.4	27.22	185.4	26.50	4.83

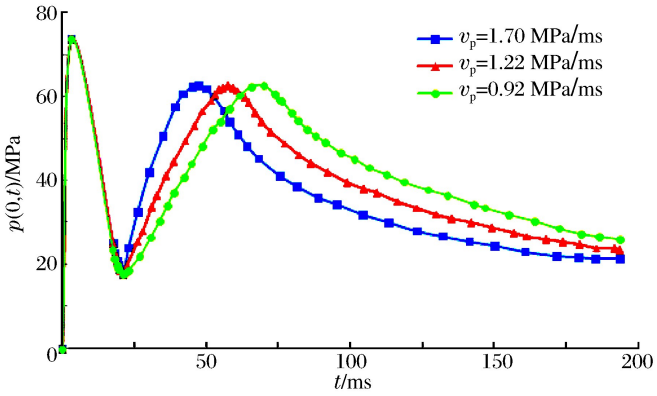


图 7 不同升压速率下缝口气体压力随时间的变化

Fig. 7 Gas pressure at the inlet with varied time at various rates of pressure rise

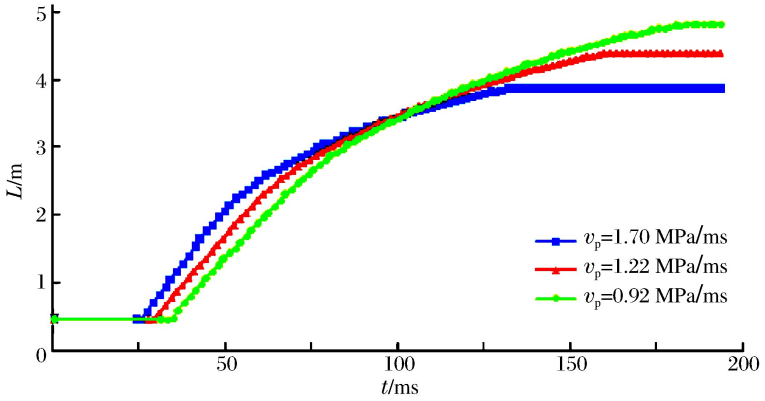


图 8 不同升压速率下裂缝长度随时间的变化

Fig. 8 Fracture lengths varied with time at various rates of pressure rise

在实际爆燃气体压裂裂缝起裂扩展过程中，升压速率越大，产生的裂缝越多，但为了分析升压速率单因素对裂缝扩展的影响，本文中忽略升压速率对裂缝条数的影响，将裂缝条数设为定值。从表 4 和图 8 可以看出，升压速率的改变对裂缝起裂压力没有影响，对裂缝止裂压力的影响也很小，这是因为裂缝起裂扩展的难易程度是岩石的一种固有属性，不会随升压速率的改变而改变；同时也可以看出，升压速率越小，在裂缝扩展前期的裂缝长度也越小，但是到了裂缝扩展中后期，小升压速率对应的裂缝扩展长度逐渐接近并超过大升压速率对应的裂缝扩展长度，这主要是由于升压速率的减小会使裂缝起裂滞后，同时使止裂也滞后，但是止裂滞后的时间远大于起裂滞后的时间，所以升压速率越小爆燃气体有效致裂作用时间越长，最终得到的裂缝扩展长度也越大。因此，控制升压速率，延长爆燃气体有效致裂作用时间是提高复合射孔施工效果的有效途径。

5 结　论

建立了复合射孔爆燃气体压裂裂缝起裂扩展模型，实现了模型的数值求解，并探讨了影响裂缝起裂扩展与止裂过程的因素，得到了以下结论与认识：

(1)裂缝扩展前期爆燃气体流动尖端与裂缝尖端重合，爆燃气体进入裂尖区域，到裂缝扩展中期裂缝扩展速度变大，爆燃气体未进入裂尖区域，再到裂缝扩展后期爆燃气体流动尖端又与裂缝尖端重合，即爆燃气体又进入裂尖区域。

(2)地应力越大，裂缝起裂压力与止裂压力越大，裂缝起裂扩展越困难，同时起裂滞后，止裂提前，即爆燃气体有效致裂作用时间越短，最终得到的裂缝扩展长度也越小。

(3)初始裂缝越长，裂缝起裂压力与止裂压力越小，裂缝更容易起裂扩展，同时起裂提前，止裂滞后，即爆燃气体能量利用率越高，裂缝扩展更长。

(4)岩石断裂韧性的改变对裂缝起裂、止裂和裂缝扩展长度的影响很小，在实际模拟计算过程中，可以将其设定为零。

(5)升压速率越小，爆燃气体有效致裂作用时间越长，最终裂缝扩展也更长，但升压速率的改变对裂缝起裂压力与止裂压力几乎没有影响。

参考文献：

[1] 李克明，张曦. 高能复合射孔技术及应用[J]. 石油勘探与开发，2002，29(5)：91-92.
Li Ke-ming, Zhang Xi. High energy combined perforation technique and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 91-92.

[2] 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.
Sun Xin-bo, Liu Hui, Wang Bao-xin, et al. Review of propellant perforation techniques[J]. Explosive Materials, 2007, 36(5): 29-31.

[3] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京：科学出版社，2003.

[4] 曹言光，刘长松，林平，等. 应用断裂力学理论建立油气井压裂时岩石破裂压力计算模型[J]. 西安石油学院学报：自然科学版，2003，18(4)：36-39.
Cao Yan-guang, Liu Chang-song, Lin Ping, et al. Establishing the models for calculating the fracturing pressure of formation rock during oil/gas wells fracturing by using fracture mechanics theory[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2003, 18(4): 36-39.

[5] Nilson R H. Gas-driven fracture propagation[J]. Journal of Applied Mechanics, 1981, 48(4): 757-762.

[6] Nilson R H, Griffiths S K. Numerical analysis of hydraulically-driven fractures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1983, 36(3): 359-370.

[7] Nilson R H, Proffer W J, Duff R E. Modeling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1985, 22(1): 3-19.

[8] Nilson R H. An integral method for predicting hydraulic fracture propagation driven by gasses or liquids[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1986, 10(2): 191-211.

[9] Petitjean L, Couet B. Modeling of gas-driven fracture propagation for oil and gas stimulation[C]// SPE28084, Rock Mechanics in Petroleum Engineering. Delft, Netherlands, 1994.

[10] Yang D W, Risnes R. Numerical modelling and parametric analysis for designing propellant gas fracturing[C]// SPE71641, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, 2001.

[11] 王家来，刘积铭. 岩石爆破破岩机理的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报，1996，15(增刊)：515-518.
Wang Jia-lai, Liu Ji-ming. Damage analysis on rock blasting mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(suppl): 515-518.

[12] 杨小林，王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理[J]. 爆炸与冲击，2001，21(2)：111-116.
Yang Xiao-lin, Wang Meng-shu. Mechanism of rock crack growth under detonation gas loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 111-116.

[13] 陈莉静,李宁,王俊奇.高能复合射孔爆生气体作用下预存裂缝起裂扩展研究[J].石油勘探与开发,2005,32(6):91-94.
Chen Li-jing, Li Ning, Wang Jun-qi. Initiation and extension of existing cracks under detonation gas loading in a high energy combined perforation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(6):91-94.

[14] 陈莉静,李宁,王俊奇.油井爆生气体对岩石劈裂作用机制探索[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11):2369-2372.
Chen Li-jing, Li Ning, Wang Jun-qi. Approximative analysis of fracture propagation driven by detonation gas in oil well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(11):2369-2372.

[15] 李宁,陈莉静,张平.爆生气体驱动岩石裂缝动态扩展分析[J].岩土工程学报,2006,28(4):460-463.
Li Ning, Chen Li-jing, Zhang Ping. Dynamic analysis for fracturing progress by detonation gas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(4):460-463.

[16] Petitjean L, Couet B. Modeling of fracture propagation during overbalanced perforating[C]// SPE28560, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, 1994.

Initiation and extension of gas-driven fracture during compound perforation*

Li Hai-tao[1], Luo Wei[1], Jiang Yu-sheng[2], Zhang Jun-song[3]
(1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu* 610500, *Sichuan, China*;
2. *CNOOC Energy Technology-Drilling & Production Co, Tianjin* 300452, *China*;
3. *Downhole Service Branch of Southwest Petroleum Engineering Company, Sinopec Corp, Deyang* 618000, *Sichuan, China*)

Abstract: Combined with the crack tip stress intensity factor criterion of linear elastic fracture mechanics, the model of initiation and extension of gas-driven fractures by compound perforation is established. A function with multiple variables describing gas pressure distribution in crack is proposed herein to realize the numerical resolution of the model using the iteration method, and the dynamic change law of gas pressure distribution in fracture with time is obtained. In addition, the effect of different characteristic parameters on the process of fracture initiation and extension as well as fracture arrest is analyzed. The example calculation shows: (1) with the progress of fracture extension, the leading edge of the flow and the fracture tip will experience the process from coincidence to noncoincidence and then to coincidence; (2) the fracture initiation and extension are more difficult as in-situ stress is greater, which makes the effective time of gas-driven and the fracture shorter; (3) the fracture initiation and extension are easier and the utilization of gas energy is higher as the initial crack is longer, resulting in the longer crack; (4) the change of fracture toughness has no obvious influence on the crack initiation and extension as well as the fracture arrest; (5) both the effective time of gas-driven and the fracture are longer as the rate of pressure rise is smaller, but its change has nearly no impact on the pressure of the fracture initiation and arrest.

Key words: mechanices of explosion; fracture initiation and extension; numerical coupled solution; compound perforation; gas pressure distribution in fracture; fracture arrest

* Received 13 November 2012; Revised 3 February 2013
Corresponding author: Luo Wei, lwswpu@163.com

(责任编辑 曾月蓉)