

·油气钻采工程·

## 致密油藏水力裂缝层内爆燃压裂非线性渗流模型

李小刚<sup>1</sup>, 易良平<sup>1\*</sup>, 杨兆中<sup>1</sup>, 宋 瑞<sup>2</sup>, 张向丞<sup>3</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.中海油能源发展股份有限公司  
工程技术分公司, 天津 300457; 3.清华大学 热能工程系, 北京 100084)

**摘要:**利用树状分形理论表征多尺度爆燃次生裂缝的复杂形态, 针对致密油藏非线性渗流特性, 建立致密油藏水力裂缝层内爆燃压裂非线性渗流模型。根据改造后致密油在地层中的不同流态, 将渗流区域分为3个区, 推导出3区耦合产能公式。产能影响因素分析结果表明: 水力裂缝层内爆燃压裂获得的单井产能约为常规水力压裂的1.5倍; 爆燃次生裂缝缝宽分形维数和迂曲度分形维数越大, 爆燃次生裂缝面积百分数和爆燃次生裂缝波及区有效渗透率越大, 单井产能越高; 爆燃次生裂缝分叉角度越小, 储层改造体积越大, 单井产能越高。在选用爆燃药剂时, 应选择能量释放率低或具多级反应速率的药剂, 以减小爆燃次生裂缝分叉角度, 增大储层改造体积, 进而提高单井产能。

**关键词:**致密油藏 爆燃压裂 树状分形 非线性渗流 产能评价

中图分类号: TE357.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)01-0116-06

## Nonlinear flow model of explosive fracturing in hydraulic fractured tight oil reservoir

Li Xiaogang<sup>1</sup>, Yi Liangping<sup>1</sup>, Yang Zhaozhong<sup>1</sup>, Song Rui<sup>2</sup>, Zhang Xiangcheng<sup>3</sup>

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China; 2.CNOOC Energy Technology & Services Limited, Tianjin City, 300457, China; 3.Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing City, 100084, China)

**Abstract:** According to the nonlinear flow characteristics in tight oil reservoir, tree-like fractal theory was used to characterize the complex multi-scale explosive fractures net and a nonlinear flow model of explosive fracturing in hydraulic fractured layers was established. According to the different flow form of tight oil in the reformed formations, the flow area was divided into three zones, and then the coupling productivity formula of the three areas was derived. Analysis results of influencing factors of the productivity show that: the single-well productivity of explosive fracturing is 1.5 times that of conventional hydraulic fracturing. Larger fractal dimension of fracture space and tortuosity bring larger area percentage of explosive fractures and higher effective permeability of swept area of secondary fractures, and thus the productivity is higher. Productivity increases with the decreasing in bifurcation angle and the increasing in stimulated reservoir volume. So in the practical application, low energy release rate dynamite or multistage reaction rate dynamite should be chosen to reduce the bifurcation angle and magnify reservoir volume and productivity.

**Key words:** tight oil reservoir; explosive fracturing; tree-like fractal; nonlinear flow; productivity evaluation

中国致密油气资源十分丰富<sup>[1-2]</sup>, 但这类资源必须经过储层改造才能实现工业化开采。目前致密油气藏的储层改造主要采用水力压裂技术<sup>[3-5]</sup>。但致密储层渗透率低, 只有水力裂缝附近区域的油气

可以通过岩石原有的微小孔隙流入主裂缝产出, 而离主裂缝较远的油气因渗流阻力大, 难以得到有效开采<sup>[6]</sup>。水力裂缝层内爆燃压裂技术是利用水力压裂技术将炸药挤入水力裂缝内, 在保证井筒完整性

收稿日期: 2016-09-28。

作者简介: 李小刚(1981—), 男, 四川仁寿人, 副教授, 博士, 从事油气田开发方面的教学和科研工作。联系电话: (028)83032050, E-mail: swpuadam@126.com。

\*通讯作者: 易良平(1991—), 男, 四川泸州人, 在读硕士研究生。联系电话: 18782949971, E-mail: ylpfrac@163.com。

基金项目: 四川省科技支撑计划“页岩气层内爆炸压裂专用炸药研制及其综合性能评价研究”(2015SZ0005)。

的条件下引燃炸药,在水力裂缝壁面产生大量爆燃次生裂缝,从而增大储层改造体积,因此该技术越来越受到重视<sup>[7]</sup>。目前,针对致密油气藏水力裂缝层内爆燃压裂井产能评价的研究尚处于起步阶段,中国学者主要根据温度场和电压场与渗流压力场的相似性,采用ANSYS二维热稳态模型和电模拟实验对水力裂缝层内爆燃压裂井产能影响因素进行分析<sup>[8-9]</sup>,但是不能描述爆燃压裂形成多尺度爆燃次生裂缝条件下的非线性渗流特征。

根据水力裂缝层内爆燃压裂形成裂缝的分布特征,利用树状分形理论对爆燃次生裂缝进行表征,推导出爆燃次生裂缝渗透率、爆燃次生裂缝面积百分数、爆燃次生裂缝波及区有效渗透率等参数的表达式。根据致密油藏的非线性渗流特性<sup>[10-12]</sup>,将层内爆燃改造后的渗流区分为基质非线性渗流区、爆燃次生裂缝波及区的椭圆线性渗流区及爆燃主裂缝线性渗流区,建立水力裂缝层内爆燃压裂3区耦合渗流模型,得到致密油藏水力裂缝层内爆燃压裂井产能公式,并分析爆燃次生裂缝参数对产能的影响,以期优化开发致密油藏提供理论依据。

## 1 爆燃压裂储层特征

由爆破理论可知,爆燃作用过程一般分为2个阶段:第1阶段,由液体炸药爆燃产生的爆燃冲击波,冲击、破碎水力裂缝壁面附近岩石,形成破碎区,施工结束后破碎区岩石颗粒可支撑地层,形成爆燃主裂缝;随着冲击波传播距离的增加,冲击波衰减为应力波,撕裂破碎区外的储层岩石,在岩石中产生大量初始微裂缝,形成裂隙区。第2阶段,爆燃产生的高温高压气体进一步对应力波产生的初始微裂缝扩展延伸,从而在爆燃主裂缝周围产生大量爆燃次生裂缝<sup>[13]</sup>,由于整个过程加载率较高,爆燃次生裂缝呈分叉状态<sup>[14]</sup>(图1)。

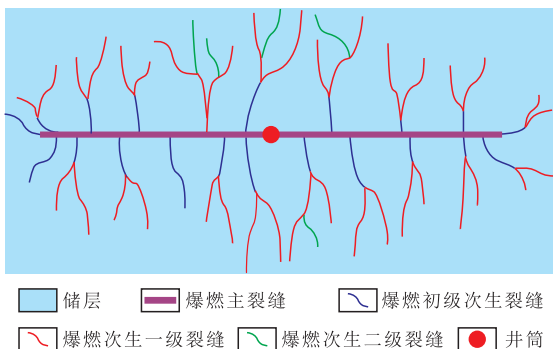


图1 水力裂缝层内爆燃压裂改造区示意

Fig.1 Schematic of reformed formation after explosive fracturing in hydraulic fractured layers

## 2 爆燃次生裂缝分形表征

假设爆燃次生裂缝与储层等高,爆燃次生裂缝由一系列分叉裂缝组成(图1),考虑爆燃次生裂缝的不均匀性,假设爆燃初级次生裂缝的缝宽分布规律满足分形标度率,则每一级裂缝的缝宽分布都具有分形特征,爆燃初级次生裂缝中缝宽大于或等于任意缝宽的裂缝条数的计算式<sup>[15]</sup>为

$$N(d \geq d_0) = \left( \frac{d_{\max}}{d_0} \right)^{D_p} \quad (1)$$

因此,爆燃初级次生裂缝的总数为

$$N_c = N(d \geq d_{\min}) = \left( \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right)^{D_p} \quad (2)$$

将式(1)对变量  $d_0$  微分,即可得到分布在无穷小区域  $d_0$  到  $d_0 + dd_0$  的爆燃初级次生裂缝条数,其表达式<sup>[16]</sup>为

$$-dN = D_p d_{\max}^{D_p} d_0^{1-D_p} dd_0 \quad (3)$$

由于储层的非均质性和爆燃高加载率,爆燃次生裂缝的每一级分叉呈迂曲状,而非直线形态,第  $k$  级分叉裂缝的实际长度为

$$L_{k,j}(d_k) = l_k d_k^{D_r} \quad (4)$$

由布辛列克方程可知,一条缝宽为  $d_0$  的爆燃初级次生裂缝的流量可表示为

$$q_0 = \frac{hd_0^3 \Delta p_0}{12\mu L_{0,j}(d_0)} \quad (5)$$

根据爆燃初级次生裂缝缝宽的分形分布,通过爆燃次生裂缝流向爆燃主裂缝的总流量为爆燃初级次生裂缝流量之和,其表达式为

$$Q = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} -q_0 dN \quad (6)$$

联立式(3)一式(6),得到总流量的表达式为

$$Q = \frac{hD_p \Delta p_0 d_{\max}^{2+D_r}}{12\mu l_0^{D_r} (2+D_r - D_p)} \left[ 1 - \left( \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right)^{2+D_r - D_p} \right] \quad (7)$$

对于单分叉网络,  $k$  级分叉裂缝生成  $n$  个  $k+1$  级子裂缝,由质量守恒定律可知,相邻两级分叉单裂缝的流量比为

$$\frac{q_k}{q_{k+1}} = n \quad (8)$$

结合式(4)、式(5)和式(8),可得相邻两级分叉裂缝的压降比为

$$\gamma = \frac{\Delta p_{k+1}}{\Delta p_k} = \frac{\alpha^{D_r}}{n\beta^{2+D_r}} \quad (9)$$

从爆燃初级次生裂缝到分叉裂缝末端的总压降为

$$\Delta p = \sum_{k=0}^m \Delta p_k = \frac{1-\gamma^{m+1}}{1-\gamma} \Delta p_0 \quad (10)$$

结合式(7)和式(10),可得总流量的表达式为

$$Q = \frac{h D_p d_{\max}^{2+D_T}(1-\gamma) \Delta p \left[ 1 - \left( \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right)^{2+D_T-D_p} \right]}{12 \mu l_0^{D_T} (2+D_T-D_p) (1-\gamma^{m+1})} \quad (11)$$

假设爆燃次生裂缝区的等压线是以爆燃主裂缝两端点为焦点的椭圆,则爆燃次生裂缝波及区的流量可表示为

$$Q = \frac{2K_{fe} \pi h \Delta p}{\mu \ln \frac{l_e + \sqrt{l_e^2 + l_f^2}}{l_f}} \quad (12)$$

其中

$$l_e = l_0 \left[ 1 + \frac{\alpha(1-\alpha^m)}{1-\alpha} \cos \theta \right] \quad (13)$$

由式(11)和式(12)可得爆燃次生裂缝的渗透率为

$$K_{fe} = \frac{D_p d_{\max}^{2+D_T} (1-\gamma) \ln \frac{l_e + \sqrt{l_e^2 + l_f^2}}{l_f}}{24 \pi l_0^{D_T} (2+D_T-D_p) (1-\gamma^{m+1})} \left[ 1 - \left( \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right)^{2+D_T-D_p} \right] \quad (14)$$

对于总分叉级数为  $m$  的单分叉网络,网络面积为

$$A_j = \sum_{k=0}^m n^k d_k L_{k,j}(d_k) \quad (15)$$

将式(4)代入式(15)并求和,得到网络面积的表达式为

$$A_j = l_0^{D_T} d_0^{2-D_T} \times \frac{1-\xi^{m+1}}{1-\xi} \quad (16)$$

其中

$$\xi = n \alpha^{D_T} \beta^{2-D_T} \quad (17)$$

对所有爆燃裂缝面积进行求和,得到分叉网络的总面积为

$$A_n = \frac{l_0^{D_T} (1-\xi^{m+1}) D_p d_{\max}^{2-D_T} \left[ 1 - \left( \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right)^{2+D_T-D_p} \right]}{(1-\xi)(2-D_T-D_p)} \quad (18)$$

爆燃次生裂缝波及区的总面积为

$$A = \pi l_e \sqrt{l_e^2 + l_f^2} \quad (19)$$

由式(18)和式(19)可得爆燃次生裂缝面积百分数为

$$f_n = \frac{A_n}{A} = \frac{l_0^{D_T} (1-\xi^{m+1}) (D_p d_{\max}^{2-D_T}) \left[ 1 - \left( \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right)^{2+D_T-D_p} \right]}{\pi l_e \sqrt{l_e^2 + l_f^2} (1-\xi) (2-D_T-D_p)} \quad (20)$$

根据等效渗透率原理,爆燃次生裂缝波及区域的有效渗透率可表示为

$$K_e = K_m (1-f_n) + K_{fe} f_n \quad (21)$$

### 3 爆燃压裂产能模型

#### 3.1 概念模型

假设爆燃次生裂缝波及区呈椭圆形,椭圆形波及区的2个焦点为爆燃主裂缝的2个端点,根据改造区形态以及致密油藏的非线性渗流特性,将层内爆燃改造后的渗流区分为基质非线性渗流区、爆燃次生裂缝波及区的椭圆线性渗流区及爆燃主裂缝线性渗流区3个区(图2)。

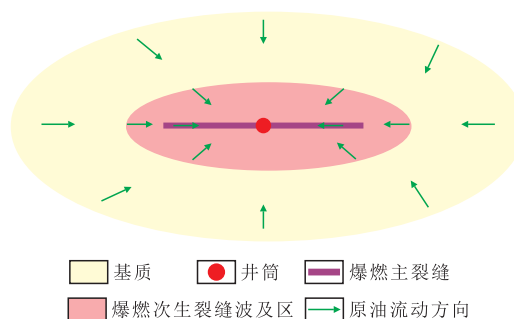


图2 水力裂缝缝层内爆燃压裂井流体流动示意

Fig.2 Schematic of fluid flow after explosive fracturing in the hydraulic fractured layers

#### 3.2 产能模型

##### 3.2.1 基质非线性渗流区

当油井生产时,基质非线性渗流区发生非线性椭圆渗流,椭圆渗流区是以油井为中心,以爆燃主裂缝两端点为焦点。因此通过保角变换,可将该区域等效为供给边界为  $\ln \left[ \frac{r_e + \sqrt{r_e^2 + l_f^2}}{l_f} \right]$ 、生产边界为  $\ln \left[ \frac{l_e + \sqrt{l_e^2 + l_f^2}}{l_f} \right]$  的单向非线性渗流区,因此基质非线性渗流区的流量为

$$Q_1 = \frac{p_e - p_1 - \frac{2G(r_e - l_e)}{\pi}}{2\pi K_m h \ln \frac{r_e + \sqrt{r_e^2 + l_f^2}}{l_e + \sqrt{l_e^2 + l_f^2}}} \quad (22)$$

##### 3.2.2 爆燃次生裂缝波及区内的椭圆线性渗流区

爆燃次生裂缝波及区的椭圆线性渗流区的渗流可等效为生产边界为 0、供给边界为  $\ln \left[ \frac{l_e + \sqrt{l_e^2 + l_f^2}}{l_f} \right]$  的单向渗流,因此该区的流量为

$$Q_2 = \frac{p_1 - p_2}{2\pi K_e h \ln \frac{l_e + \sqrt{l_e^2 + l_f^2}}{l_f}} \quad (23)$$

3.2.3 爆燃主裂缝线性渗流区

由于爆燃主裂缝中的流体渗流为线性渗流,可用达西定律描述其流体流动过程,其运动方程为

$$v = \frac{Q_3 x}{2w_f h l_f} = \frac{K_f}{\mu} \times \frac{dp}{dx} \quad (24)$$

边界条件为

$$\begin{cases} x=0, p=p_w \\ x=l_f, p=p_2 \end{cases} \quad (25)$$

将式(25)代入式(24)积分可得爆燃主裂缝线性渗流区的流量为

$$Q_3 = \frac{p_2 - p_w}{\frac{\mu l_f}{4K_f w_f h}} \quad (26)$$

3.2.4 3区耦合

因为3个区域串联供油,则 $Q_1=Q_2=Q_3=Q$ ,联立式(22)、式(23)和式(26)可得

$$Q = \frac{p_e - p_w - \frac{2G(r_e - l_c)}{\pi}}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (27)$$

其中

$$R_1 = \frac{\mu}{2\pi K_m h} \ln \frac{r_e + \sqrt{r_e^2 + l_f^2}}{l_e + \sqrt{l_e^2 + l_f^2}} \quad (28)$$

$$R_2 = \frac{\mu}{2\pi K_e h} \ln \frac{l_e + \sqrt{l_e^2 + l_f^2}}{l_f} \quad (29)$$

$$R_3 = \frac{\mu l_f}{4K_f w_f h} \quad (30)$$

4 爆燃压裂产能影响因素

模拟参数包括:井底压力为10 MPa,边界压力为30 MPa,地层原油粘度为5 mPa·s,启动压力梯度为0.7 MPa/m,储层厚度为20 m,基质渗透率为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,爆燃主裂缝渗透率为 $100 \mu\text{m}^2$ ,储层供给边界到爆燃主裂缝的垂直距离为30 m,爆燃主裂缝半长为100 m,爆燃初级次生裂缝长度为4 m,爆燃主裂缝缝宽为5 mm,分叉角度为 $15^\circ$ ,分叉级数为3。

压裂方式 在主裂缝长度和导流能力相同的条件下,分析水力裂缝层内爆燃压裂与常规水力压裂的产能随生产压差的变化(图3)可知,2种储层改造方式获得的产能均随生产压差的增大而线性增大,爆燃压裂产能约为常规水力压裂产能的1.5倍。这是因为水力裂缝层内爆燃压裂在爆燃主裂缝附近产生了若干爆燃次生裂缝,在爆燃主裂缝附近形成了一个局部高渗透带,减小了地层流体流动阻力,所以水力裂缝层内爆燃压裂比常规水力压裂

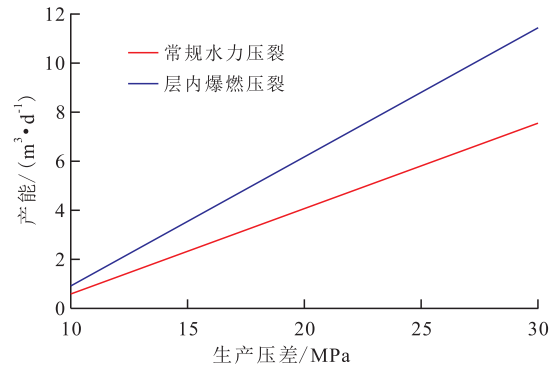


图3 水力裂缝层内爆燃压裂与常规水力压裂产能对比

Fig.3 Comparison of productivity by explosive fracturing and conventional hydraulic fracturing

的产能高。

分形维数 分析分形维数对爆燃次生裂缝波及区性质的影响可知:①爆燃次生裂缝渗透率与次生裂缝缝宽分形维数呈正相关关系,与爆燃次生裂缝迂曲度分形维数呈反相关关系(图4)。②由于爆燃次生裂缝条数随爆燃次生裂缝缝宽分形维数增加而增加,且爆燃次生裂缝长度与爆燃次生裂缝迂曲度分形维数呈正相关关系,因此爆燃次生裂缝面积百分数与爆燃次生裂缝缝宽分形维数和爆燃次生裂缝迂曲度分形维数均呈正相关关系(图5)。③爆燃次生裂缝波及区的有效渗透率和产能均随着

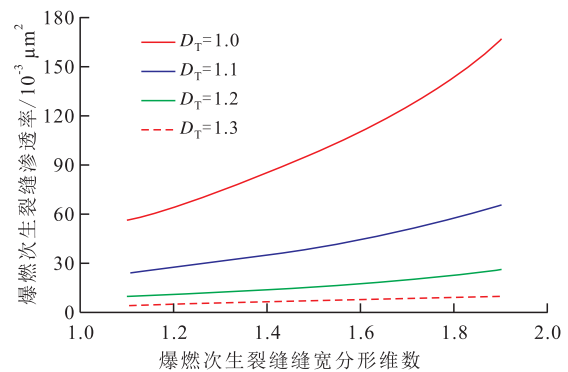


图4 分形维数对爆燃次生裂缝渗透率的影响

Fig.4 Effect of fractal dimension on explosive fracture permeability

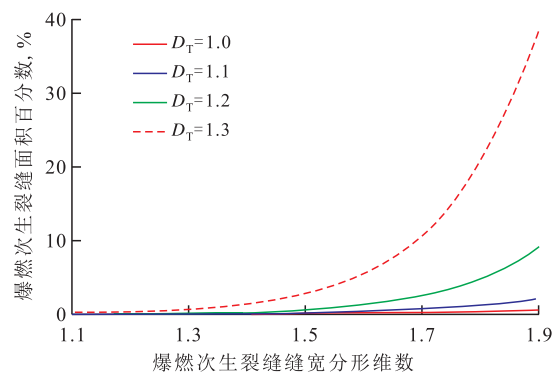


图5 分形维数对爆燃次生裂缝面积百分数的影响

Fig.5 Effect of fractal dimension on the area percentage of explosive fracture

爆燃次生迂曲度分形维数的增大而增加(图6,图7)。这是因为,当爆燃次生裂缝缝宽分形维数相同时,随着爆燃次生迂曲度分形维数的增大,虽然裂缝的渗透率降低了,但是爆燃次生裂缝面积百分数增加了,因此爆燃次生裂缝波及区的有效渗透率增加了,故产能增加了。

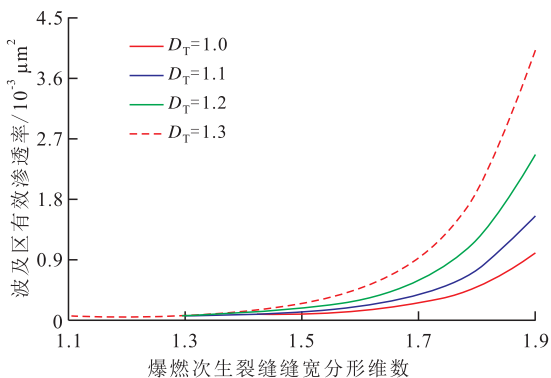


图6 分形维数对爆燃次生裂缝波及区有效渗透率的影响

Fig.6 Effect of fractal dimension on the effective permeability of the swept area of explosive fracture

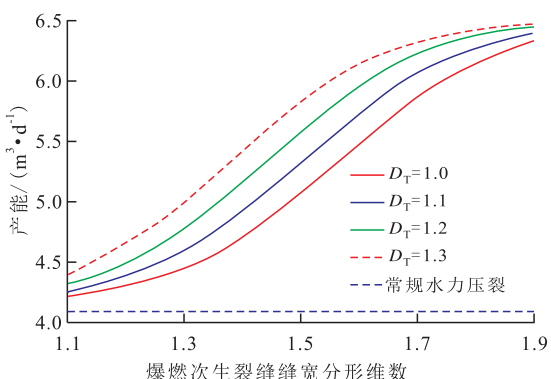


图7 分形维数对产能的影响

Fig.7 Effect of fractal dimension on productivity

改造体积 由图8可知:①随着爆燃主裂缝半长或椭圆改造区短半轴的增加,改造区体积增加,单井产能也随之增加;②椭圆改造区短半轴随分叉角度的增大而减小,因此在选用爆燃药剂时,应选择能量释放率低或具有多级反应速度的药剂,以降

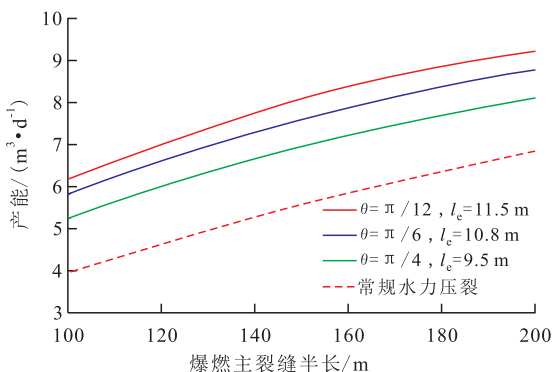


图8 改造体积对产能的影响

Fig.8 Effect of stimulated volume on productivity

低爆燃次生裂缝扩展速度,减小分叉角度,增加椭圆改造区短半轴长度,提高产能。

## 5 结论

算例分析结果表明:次生裂缝渗透率与缝宽分形维数呈正相关关系,与迂曲度分形维数呈反相关关系;次生裂缝面积百分数和波及区有效渗透率均与缝宽分形维数和迂曲度分形维数呈正相关关系。

根据致密油藏的非线性渗流特性,将层内爆燃改造后的渗流区域分为3个区:基质非线性渗流区、爆燃次生裂缝波及区的椭圆线性渗流区和主裂缝线性渗流区。建立了3区耦合渗流模型,得到了致密油藏水力裂缝层内爆燃压裂井产能公式。通过计算分析可知:在相同条件下,层内爆燃压裂产能约为常规水力压裂产能的1.5倍;缝宽分形维数以及迂曲度分形维数均与产能呈正相关关系。

椭圆改造区短半轴越长,储层改造体积越大,单井产能越高。因此建议在选用爆燃药剂时,应选择能量释放率低或具有多级反应速度的药剂,从而降低次生裂缝扩展速度,减小分叉角度,增大椭圆改造区短半轴长度,从而提高单井产能。

### 符号解释:

$N$  ——爆燃次生裂缝条数;  $d$  ——缝宽, m;  $d_0$  ——任意缝宽, m;  $D_p$  ——爆燃次生裂缝缝宽分形维数;  $N_c$  ——爆燃初级次生裂缝条数;  $k$  ——分叉裂缝级数;  $L_{k,j}$  ——第  $j$  条爆燃裂缝第  $k$  级分叉裂缝的实际长度, m;  $j$  ——爆燃裂缝编号;  $d_k$  ——第  $k$  级分叉裂缝的缝宽, m;  $l_k$  ——第  $k$  级分叉裂缝的直线长度, m;  $D_T$  ——分叉裂缝的迂曲度分形维数;  $q_0$  ——爆燃初级次生裂缝的流量,  $m^3/d$ ;  $h$  ——爆燃次生裂缝高度, m;  $\Delta p_0$  ——爆燃初级次生裂缝的沿程压降, MPa;  $\mu$  ——地层流体粘度,  $mPa \cdot s$ ;  $L_{0,j}$  ——第  $j$  条爆燃裂缝的初级次生裂缝的实际长度, m;  $Q$  ——爆燃次生裂缝流向爆燃主裂缝的总流量,  $m^3/d$ ;  $l_0$  ——爆燃初级次生裂缝长度, m;  $n$  ——分叉个数, 本次模拟取值为2;  $\Delta p_{k+1}$  ——第  $k+1$  级分叉裂缝内的压降, MPa;  $\Delta p_k$  ——第  $k$  级分叉裂缝内的压降, MPa;  $\alpha$  ——相邻两级分叉裂缝的长度比;  $\beta$  ——相邻两级分叉裂缝的缝宽比;  $\gamma$  ——相邻两级分叉裂缝的压降比;  $\Delta p$  ——爆燃初级次生裂缝到分叉裂缝末端的总压降, MPa;  $m$  ——总分叉级数;  $K_c$  ——爆燃次生裂缝的渗透率,  $m^2$ ;  $l_c$  ——爆燃次生裂缝到爆燃主裂缝的最远距离, m;  $l_f$  ——爆燃主裂缝半长, m;  $\theta$  ——爆燃次生裂缝分叉角度, ( $^\circ$ );  $A_j$  ——第  $j$  条爆燃裂缝所占面积,  $m^2$ ;  $A_n$  ——分叉网络裂缝的总面积,  $m^2$ ;  $A$  ——爆燃次生裂缝波及区的总面积,  $m^2$ ;  $f_n$  ——爆燃次生裂缝面积百分数;  $K_c$  ——爆燃次生裂缝波

及区的有效渗透率,  $m^2$ ;  $K_m$ ——基质渗透率,  $m^2$ ;  $Q_1$ ——基质区流量,  $m^3/d$ ;  $p_e$ ——供给边界压力, MPa;  $p_1$ ——爆燃次生裂缝波及区边缘压力, MPa;  $G$ ——启动压力梯度, MPa/m;  $r_e$ ——供给边界到爆燃主裂缝的垂直距离, m;  $Q_2$ ——爆燃次生裂缝波及区流量,  $m^3/d$ ;  $p_2$ ——爆燃主裂缝尖端压力, MPa;  $v$ ——原油流速, m/d;  $Q_3$ ——爆燃主裂缝区流量,  $m^3/d$ ;  $x$ ——原油流动距离, m;  $w_f$ ——爆燃主裂缝缝宽, m;  $p_w$ ——井底压力, MPa;  $K_f$ ——爆燃主裂缝渗透率,  $m^2$ ;  $p$ ——压力, MPa。

#### 参考文献:

- [1] 张新顺, 王红军, 马锋, 等. 致密油资源富集区与“甜点区”分布关系研究——以美国威利斯顿盆地为例[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 619-626.  
Zhang Xinshun, Wang Hongjun, Ma Feng, et al. Relationship between resource-rich regions and sweet spots for tight oils: A case study of the Williston Basin in the USA [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 619-626.
- [2] 李志强, 赵金洲, 胡永全, 等. 致密油层多区体积压裂产能预测[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 134-138.  
Li Zhiqiang, Zhao Jinzhou, Hu Yongquan, et al. Productivity forecast of tight oil reservoirs after multi-zone stimulated reservoir volume fracturing [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 134-138.
- [3] 陈志明, 廖新维, 赵晓亮, 等. 体积压裂直井油气产能预测模型[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(6): 121-126.  
Chen Zhiming, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. Productivity model of oil/gas productivity of vertical wells in simulated reservoir volume [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 121-126.
- [4] 方思冬, 战剑飞, 黄世军, 等. 致密油藏多角度裂缝压裂水平井产能计算方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 84-89.  
Fang Sidong, Zhan Jianfei, Huang Shijun, et al. A computational method for productivity of arbitrary angular fractured horizontal well in tight oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 84-89.
- [5] 刘雄, 田昌炳, 纪淑红, 等. 致密油藏体积压裂直井非稳态压力分析[J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 95-99.  
Liu Xiong, Tian Changbing, Ji Shuhong, et al. Transient pressure analysis of volume fracturing in vertical wells in tight reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(5): 95-99.
- [6] 丁雁生, 陈力, 谢燮, 等. 低渗透油气田“层内爆炸”增产技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 90-96.  
Ding Yanshen, Chen Li, Xie Xie, et al. On the stimulation with “exploding in fractures” in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 90-96.
- [7] 翁定为, 张启汉, 卢拥军, 等. 提高砂岩储层人工裂缝复杂度的压裂技术及其应用[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 1 085-1 089.  
Weng Dingwei, Zhang Qihan, Lu Yongjun, et al. Study and application on improving hydraulic fracture complexity in sandstone reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 1 085-1 089.
- [8] 陈德春, 黄新春, 张琪, 等. 水力裂缝层内爆燃压裂油井产能模型模拟实验评价[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(5): 71-73.  
Chen Dechun, Huang Xinchun, Zhang Qi, et al. Evaluation of productivity model for hydraulic fracturing wells with exploding in fracture front by electricity similarity experiment [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(5): 71-73.
- [9] 孟红霞, 郭清, 陈德春, 等. 水力裂缝层内爆燃油井产能评价与分析[J]. 钻采工艺, 2007, 30(3): 72-75.  
Meng Hongxia, Guo Qing, Chen Dechun, et al. Productivity evaluation of explosive fracturing well within the hydraulic fractured formation [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(3): 72-75.
- [10] 尹芝林, 赵国忠, 张乐. 基于非达西、压敏效应及裂缝的数模技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(3): 57-60.  
Yin Zhilin, Zhao Guozhong, Zhang Le. Numerical simulation techniques on the bases of non-Darcy and pressure-sensitivity and fractures [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(3): 57-60.
- [11] 张晓亮, 杨仁锋, 李娜. 考虑启动压力梯度的弹性采收率计算方法及影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(2): 72-77, 87.  
Zhang Xiaoliang, Yang Renfeng, Li Na. Computing method and influencing factors of natural depletion oil recovery in consideration of threshold pressure gradient [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 72-77, 87.
- [12] 王明磊, 张遂安, 关辉, 等. 致密油储层特点与压裂液伤害的关系——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 848-854.  
Wang Minglei, Zhang Sui'an, Guan Hui, et al. Relationship between characteristics of tight oil reservoirs and fracturing fluid damage: A case from Chang 7 Member of the Triassic Yanchang Fm in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 848-854.
- [13] 赵志红, 郭建春. 层内爆炸压裂技术原理及分析[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2): 297-299.  
Zhao Zhihong, Guo Jianchun. Interlayer explosive fracturing principle and analysis [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2): 297-299.
- [14] 张宗贤, 俞洁. 岩石宏观裂纹分叉的加载率效应[J]. 北京科技大学学报, 1995, 17(2): 112-115.  
Zhang Zongxian, Yu Jie. Effect of loading rates on macro-crack bifurcation of rock [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1995, 17(2): 112-115.
- [15] 朱维耀, 岳明, 高英, 等. 致密油层体积压裂非线性渗流模型及产能分析[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 248-254.  
Zhu Weiyao, Yue Ming, Gao Ying, et al. Nonlinear flow model and productivity of stimulated reservoir volume in tight oil reservoirs [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 248-254.
- [16] 徐鹏. 树状分形分叉网络的输运特性[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 23-26.  
Xu Peng. Transport properties of fractal tree-like branching network [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 23-26.