

# 致密油藏体积压裂水平井动用规律

——以长庆油田为例

徐黎明<sup>1</sup>, 王利明<sup>2</sup>, 牛小兵<sup>1</sup>, 郝炳英<sup>1</sup>, 阎逸群<sup>2</sup>, 陈斯宇<sup>2</sup>, 姚飞<sup>2</sup>

(1. 中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 2. 中国石油大学(北京) 石油工程学院, 北京 102249)

**摘要:** 压裂水平井已越来越广泛地应用于低渗透致密油藏开发, 然而, 关于压裂水平井动用规律的研究报道较少。为弥补这一不足, 利用条带源模拟体积压裂水平井的裂缝, 推导考虑启动压力梯度的体积压裂水平井压力公式, 以长庆油田为例, 对致密油藏体积压裂水平井的动用规律进行研究。结果表明: 体积压裂水平井单井开发时, 随着开发时间的增加, 动用半径先增大后减小; 随着水平井段长度的增加, 纵、横向动用半径越来越大, 但相对变化幅度却较小。半缝长的增加对纵、横向的动用半径影响不同, 随着半缝长的增加, 横向动用半径越来越大, 但基质动用半径越来越小; 纵向动用半径越来越小。随着缝网宽的增加, 纵、横向的动用半径越来越大, 但变化幅度越来越小。

**关键词:** 致密油藏 体积压裂 水平井 动用规律 长庆油田

中图分类号: TE357.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)06-0087-07

## Drainage boundary laws of horizontal well with stimulated reservoir volume fracturing in tight oil reservoirs: A case study of Changqing oilfield

Xu Liming<sup>1</sup>, Wang Liming<sup>2</sup>, Niu Xiaobing<sup>1</sup>, Hao Bingying<sup>1</sup>, Yan Yiqun<sup>2</sup>, Chen Siyu<sup>2</sup>, Yao Fei<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an City, Shaanxi Province, 710018, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China)

**Abstract:** Fractured horizontal wells are increasingly widely used in tight oil reservoirs with low permeability. However, most studies on drainage radius are primarily associated with vertical wells while few studies on horizontal wells. With the case of Changqing oilfield, the fractures in the horizontal wells generated by stimulated reservoir volume fracturing were simulated by band source. Pressure distribution equations of stimulated reservoir volume fracturing for horizontal wells are derived considering threshold pressure gradient, and drainage radius of fractured horizontal wells in tight oil reservoir can be studied. The results show that drainage radius first increases and then decreases with development time increasing, and drainage radius increases slightly as length of horizontal well increases. The hydraulic fracture half-length exerts different influence on drainage radius in the horizontal and vertical direction respectively, which shows that the horizontal drainage radius increases and the drainage radius of matrix and vertical drainage radius decrease as the increase of hydraulic fracture half-length. Increase of network width helps expand the drainage radius in the both directions, but its effect on drainage radius gradually becomes weaker.

**Key words:** tight oil reservoir; stimulated reservoir volume fracturing; horizontal well; laws of drainage boundary; Changqing oilfield

随着常规油藏的开发, 中国现有剩余探明储量 主要集中在低渗透致密油藏。低渗透致密油藏孔

收稿日期: 2016-07-12。

作者简介: 徐黎明(1962—), 男, 浙江衢州人, 教授级高级工程师, 博士, 从事长庆油田石油勘探、评价等相关工作。联系电话: (029) 86598506, E-mail: ming20090827@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“中国非常规油气储层分类与典型地质模型建立”(41390451), 国家重点基础研究发展计划“中国陆相致密油(页岩油)形成机理与富集规律基础研究”之课题3“淡水湖盆细粒沉积与富有机质页岩形成机理”(2014CB239003)。

隙小、喉道小<sup>[1-3]</sup>,启动压力梯度对其产能影响较大,原油在多孔介质中的流动偏离达西渗流定律<sup>[4-6]</sup>。只有当压力梯度大于启动压力梯度时,原油才能流动。由于注水开发比较困难,在开发初期及较长的一段时间内一般采用压裂水平井进行衰竭开发。然而,目前对压裂水平井动用规律的研究报道较少,大部分都是针对直井动用半径的研究<sup>[7-10]</sup>。为弥补这一不足,建立考虑启动压力梯度的渗流数学模型,推导考虑启动压力梯度的体积压裂水平井压力公式,以长庆油田为例,对体积压裂水平井的动用规律进行研究,以指导致密油藏开发井位部署。

### 1 考虑启动压力梯度渗流数学模型的建立

在低渗透致密油藏中,启动压力梯度对渗流速度的影响<sup>[11-13]</sup>可表示为

$$\begin{cases} v=0 & \frac{\partial p}{\partial r} \leq G \\ v=-\frac{K}{\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial r}-G\right) & \frac{\partial p}{\partial r} > G \end{cases} \quad (1)$$

与常规压裂相比,体积压裂的优势是能在近井地带形成压裂改造带,可对地层及渗流场形成较大幅度的改造。2个条带源通过 Newman 乘积组合形成1个定长宽的条带源,可用以模拟体积压裂水平井的压裂改造带。多个条带源叠加可模拟体积压裂水平井渗流场<sup>[14]</sup>(图1)。

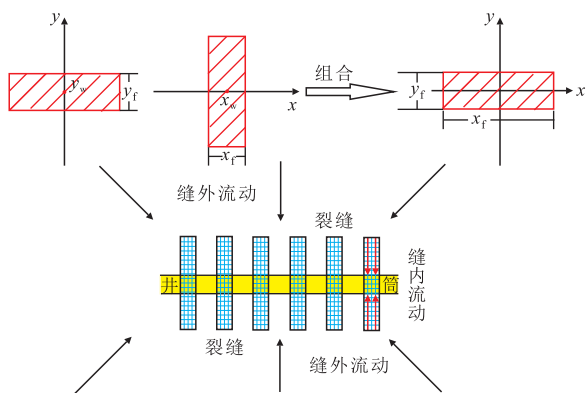


图1 条带源模拟体积压裂水平井  
Fig.1 Application of band source function (spatial network fracturing)

在条带源模拟的体积压裂水平井中(图1),流体流动包括2部分:①考虑启动压力梯度的缝外流动,由基质流向裂缝;②不考虑启动压力梯度的缝内流动,由裂缝流向井筒,假设为线性流。

对于缝外流动,其假设条件包括:①均质、等厚、无穷大地层中心有一点源以一定产油量生产;

- ②流体单相弱可压缩,渗流满足低速非达西定律;
- ③忽略重力及毛管压力作用;④流动为等温过程。

渗流控制方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial p}{\partial r} - G\right) = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

初始条件为

$$p(r,0) = p_e \quad (3)$$

若令式(2)的边界条件为内边界定产,则

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r} - G\right) \Big|_{r=r_w} = \frac{Q\mu B}{2\pi Khr_w} \quad (4)$$

动边界处压力梯度等于启动压力梯度,则

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r} - G\right) \Big|_{r=R(t)} = 0 \quad (5)$$

动边界之外的压力等于原始地层压力,则

$$p[r \geq R(t)] = p_e \quad (6)$$

引入中间函数

$$\eta = \frac{K}{\phi\mu c} \quad (7)$$

联立式(2)一式(7)得

$$p(r,t) = p_e - \frac{Q\mu B}{4\pi Kh} e^{\frac{r_w^2}{4\eta t}} \left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4\eta t}\right)\right] + G(r-r_w) \approx p_e - \frac{Q\mu B}{4\pi Kh} \left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4\eta t}\right)\right] + Gr \quad (8)$$

在不考虑有限导流的情况下,可以认为条带源中不存在压力差,因此将式(8)进行相应处理,得线性渗流条带源的解为

$$\frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \frac{\frac{x_f}{2} + (x-x_w)}{\sqrt{4\eta t}} + \operatorname{erf} \frac{\frac{x_f}{2} - (x-x_w)}{\sqrt{4\eta t}} \right] = \frac{\phi c}{\delta} [p_e - \tilde{p}(x,t) + Grx] \quad (9)$$

通过 Newman 乘积组合,得到定长宽的条带源函数为

$$\frac{\phi c}{\delta} [p_e - \tilde{p}(x,t) + Gr_{xy}] = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erf} \frac{\frac{x_f}{2} + (x-x_w)}{\sqrt{4\eta t}} + \operatorname{erf} \frac{\frac{x_f}{2} - (x-x_w)}{\sqrt{4\eta t}} \right] \times \left[ \operatorname{erf} \frac{\frac{y_f}{2} + (y-y_w)}{\sqrt{4\eta t}} + \operatorname{erf} \frac{\frac{y_f}{2} - (y-y_w)}{\sqrt{4\eta t}} \right] \quad (10)$$

其中  $r_{xy} = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ ,若点处于条带源内,则

$r_x = 0$ ;若  $r_x > 0$ ,则  $r_x = |x-x_w| - \frac{x_f}{2}$ ,同理可得  $r_y$ 。

假设体积压裂水平井中第k条裂缝历史流量为

$Q_{k,t}$ ,该裂缝等效的条带源函数会引起坐标为  $(x,y)$  的点的压降,在  $t$  时刻引起的压降为

$$\Delta p(x,y,x_k,y_k,t) = p_e - \left[ p(x,y,x_k,y_k,t) - G\sqrt{r_{x,k}^2 + r_{y,k}^2} \right] = \frac{B}{2hx_f y_f \phi c} \sum_{i=1}^n (Q_{k,i} - Q_{k,i-1}) \times \int_0^{t_n - t_{i-1}} \left[ \operatorname{erf} \frac{\frac{x_f}{2} + (x - x_k)}{\sqrt{4\eta t}} + \operatorname{erf} \frac{\frac{x_f}{2} - (x - x_k)}{\sqrt{4\eta t}} \right] \times \left[ \operatorname{erf} \frac{\frac{y_f}{2} + (y - y_k)}{\sqrt{4\eta t}} + \operatorname{erf} \frac{\frac{y_f}{2} - (y - y_k)}{\sqrt{4\eta t}} \right] dt \quad (11)$$

$N$  条裂缝对地层中坐标为  $(x,y)$  的点在  $t$  时刻共同作用所引起的真实压降为

$$\Delta p(x,y,t) = \sum_{k=1}^N \Delta p(x,y,x_k,y_k,t) \quad (12)$$

式(12)求解的关键在于求解每条缝每一离散时间的流量,对第  $k$  条裂缝  $t$  时刻流量的求解方程为

$$Q_{k,n} = A^{-1}(x,y,x_k,y_k,t) \times [\Delta p(x,y,x_k,y_k,t) - B(x,y,x_k,y_k,t)] \quad (13)$$

在已知  $\Delta p(x,y,x_k,y_k,t)$  情况下可求得对应的  $Q_{k,n}$ 。某一点处的压降  $\Delta p(x,y,x_k,y_k,t)$  是由  $N$  条裂缝共同作用引起的,若以定井底压力生产,则联立求解各条裂缝流量的矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} A(x_1,y_1,x_1,y_1,t) & \cdots & A(x_1,y_1,x_N,y_N,t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A(x_N,y_N,x_1,y_1,t) & \cdots & A(x_N,y_N,x_N,y_N,t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1,n} \\ \vdots \\ Q_{N,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N B(x_1,y_1,x_k,y_k,t) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^N B(x_N,y_N,x_k,y_k,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_e - p_{\Pi,n} \\ \vdots \\ p_e - p_{IV,n} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由于不考虑缝内的启动压力梯度且为线性流,第  $k$  条裂缝内的流动方程为

$$Q_{k,n} = \frac{ky_f h}{\mu} \left( \frac{p_{k,n} - p_w}{\frac{x_f}{2}} \right) \quad (15)$$

## 2 模型验证

对长庆油田致密油藏 X 井区进行模型计算。X 井区有 10 口水平井,目标油层为长 7 油层,油层有

效厚度为 11.2 m。X 井区平均孔隙度为 10.5%,平均渗透率为  $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,初始含油饱和度为 51%,地层压力为 25 MPa,井底压力为 10 MPa,水平井段长度为 1 000 m,裂缝条数为 10 条,半缝长为 300 m,缝网宽为 40 m,区域大小为 3 000 m $\times$ 3 000 m。

考虑封闭边界的情况下联立式(14)和式(15),可以求解无限大边界条件下 1 口体积压裂水平井压力分布,水平井最大动用半径在  $\Delta p = 0$  处;利用 Eclipse 数值模型进行模拟,同时对致密油藏体积压裂水平井动用规律进行分析。假设垂直于水平井段的方向为横向,平行于水平井段的方向为纵向,从体积压裂水平井横向和纵向 2 个方向分析动用半径变化,并验证推导模型的准确性。

随着体积压裂水平井的开发,水平井周围压力降低,当压力梯度大于启动压力梯度时,外围流体流入进来,动用半径越来越大,但是随着时间增加到一定值,动用半径随时间的增加而减小。

### 2.1 横向动用半径

随着体积压裂水平井的生产,横向动用半径越来越大(图 2)。当生产达到 52 个月时,横向动用半径达到最大,为 540 m。继续生产,井周围压力不断下降,压力梯度减小,横向动用半径越来越小。横向动用半径模型计算结果和数值模拟计算结果相差很小。

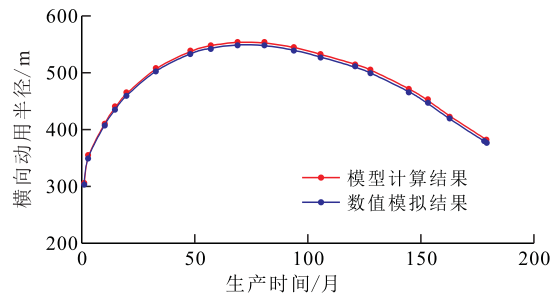


图 2 横向动用半径变化规律  
Fig.2 Trend of horizontal drainage radius

### 2.2 纵向动用半径

随着体积压裂水平井的生产,纵向动用半径变化规律和横向相同,都是先增大后减小(图 3)。当

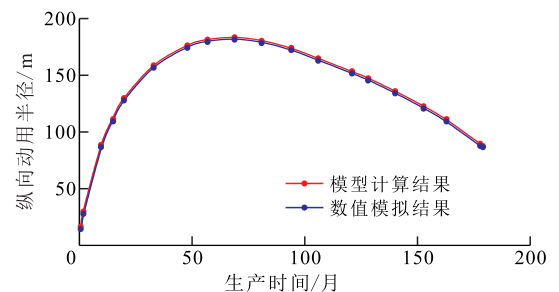


图 3 纵向动用半径变化规律  
Fig.3 Trend of vertical drainage radius

生产到66个月时,纵向动用半径达到最大,为183 m。纵向动用半径模型计算结果和数值模拟计算结果相差很小。

从图2和图3可知:模型计算结果几乎与数值模拟结果一致,无论是横向还是纵向,体积压裂水平井动用半径变化规律一致,先增大后减小。这是由于定井底压力生产时,初始井底周围的压力会快速降低,造成缝网内流体亏空,缝网外的流体会在压力梯度作用下流入缝网内部,动用半径外的压力梯度大于启动压力梯度,所以动用半径越来越大;但是由于该水平井处于封闭边界地层,压力梯度会恒小于启动压力梯度,所以后期动用半径会随着时间的增加而减小。

### 3 动用规律影响因素

在致密油藏体积压裂水平井生产过程中,不同施工参数对开发的影响不同。因此,分析了水平井段长度、半缝长、缝网宽3个因素对水平井动用规律的影响。在研究区基本参数的基础上,考虑体积压裂水平井组井距为1 500 m,排距为500 m,利用镜像反映原理等效为封闭边界中1口体积压裂水平井进行计算。

#### 3.1 横向影响因素

##### 3.1.1 水平井段长度

分别对600,800,1 000,1 200 m共4个水平井段长度进行分析,对应的裂缝条数分别为6,8,10和12条,缝网宽为40 m,半缝长为300 m。

由图4可见,在前20个月内,水平井段长度的增加对横向动用半径几乎没有影响;在20到100个月时,随着水平井段长度的增加,横向动用半径变大,因为水平井段越长,缝越多,各缝间的干扰越大,造成生产区域的压降较快,生产压力梯度大,所以横向动用半径大。

虽然随着水平井段长度的增加,横向动用半径会变大,但是水平井段长度对横向最大动用半径的影响不大,水平井段长度为1 200 m的横向最大动用半径仅比水平井段长度为600 m的横向最大动用半径长40 m。水平井段长度的增加对横向最大动用半径的影响较小。

##### 3.1.2 半缝长

分别对100,200,300,400和500 m共5种半缝长的水平井进行分析,水平井段长度为1 000 m,裂缝条数为10条,缝宽为40 m。

在相同生产时间时,随着半缝长的增加,横向

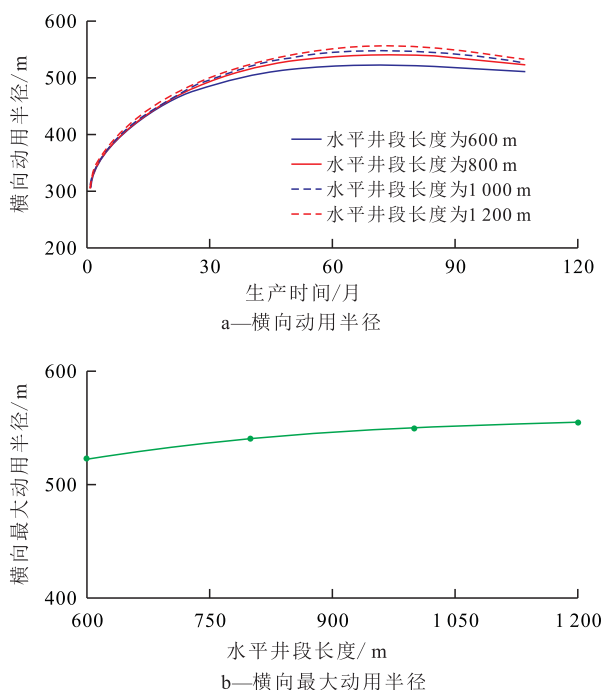


图4 不同水平井段长度下的横向动用半径变化规律

Fig.4 Variation of horizontal drainage radius with length of horizontal section

动用半径增大,横向最大动用半径随着半缝长的增加也不断增大(图5)。

由于压裂区内部不考虑启动压力梯度,仅仅只是分析整体的动用并不全面。横向最大动用半径减去半缝长可以得到横向基质最大动用半径(图5),随着半缝长的增加,横向基质最大动用半径越来越小。因此可以预见,随着半缝长的增加,到达

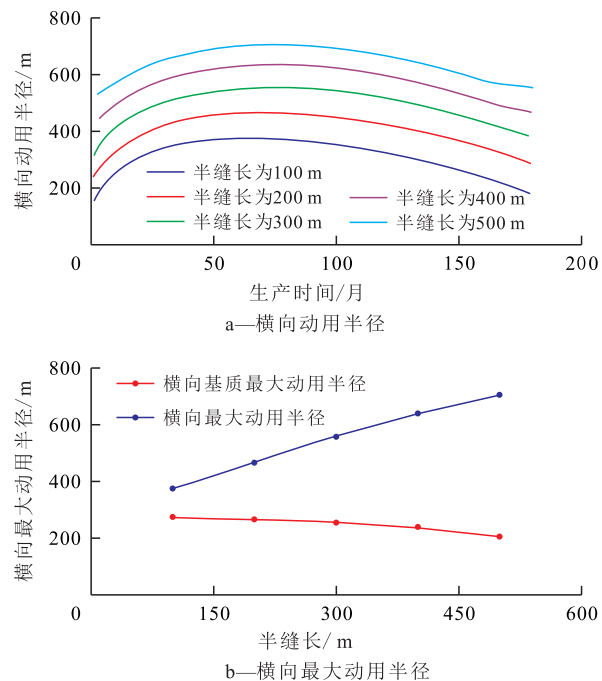


图5 不同半缝长条件下的横向动用半径变化规律

Fig.5 Variation of horizontal drainage radius with hydraulic fracture half-length



一定程度时,横向基质最大动用半径为0。该规律可以用来选择最优井距(即压裂缝长)。

### 3.1.3 缝网宽

分别对 20, 40, 60 和 80 m 共 4 种缝网宽的水平井进行分析,水平井段长度为 1 000 m,裂缝条数为 12 条,半缝长为 300 m。

随着缝网宽的增加,横向动用半径增大,但是增大的幅度越来越小,缝网宽增加到一定程度时,不再影响横向动用半径。横向最大动用半径也随着缝网宽的增加而增加,最后趋近于不变(图 6)。

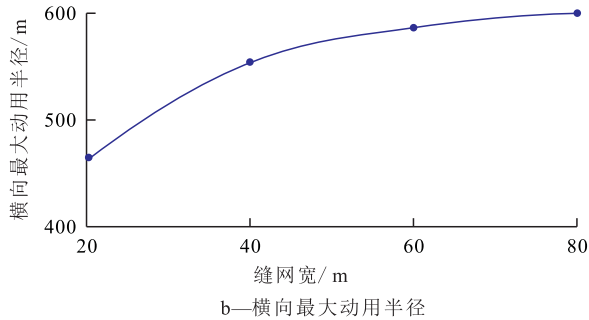
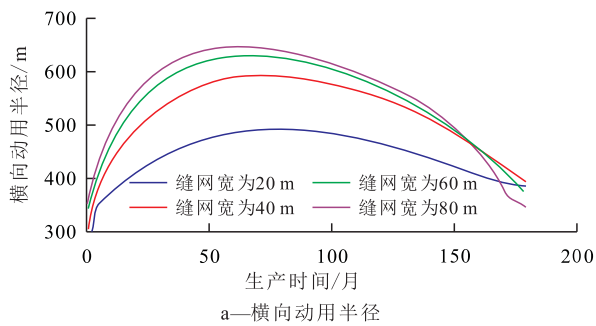


图6 不同缝网宽下的横向动用半径变化规律

Fig.6 Variation of horizontal drainage radius with fracture network width

横向动用半径随着生产时间的增加先增加后减小,其原因是,在井组情况下,周围井会对地层压力产生影响。随着生产时间增加,井底周围压降较快,所以横向动用半径不断增加,当生产到一定时间时,由于存在封闭边界,横向动用半径随着时间增加而缓慢减小。

## 3.2 纵向影响因素

### 3.2.1 水平井段长度

在生产时间为 60 个月前,水平井段长度对纵向动用半径几乎无影响。生产时间达 60 个月后,水平井段长度对纵向动用半径影响很小(图 7)。随着水平井段长度的增加,纵向最大动用半径基本不变,水平井段长度为 1 200 m 的纵向最大动用半径只比水平井段长度为 600 m 的纵向最大动用半径长 4 m。因此,在致密油藏体积压裂水平井开发中,水平井段长度对纵向动用半径的影响很小。

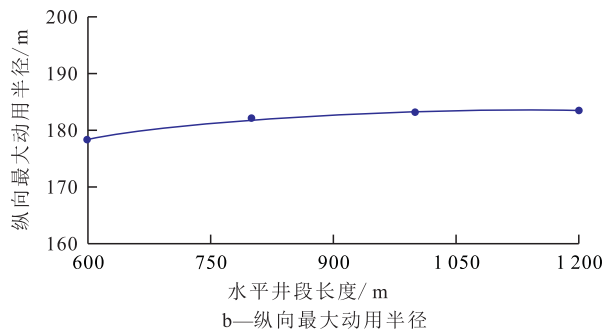
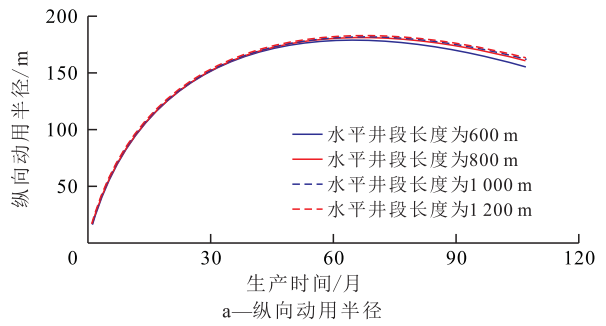


图7 不同水平井段长度下的纵向动用半径变化规律

Fig.7 Variation of vertical drainage radius with length of horizontal section

### 3.2.2 半缝长

在相同生产时间下,纵向动用半径随半缝长增大而减小,而且半缝长越短,前期纵向动用半径增加越快,同时后期纵向动用半径减小越慢(图 8)。因为随着半缝长的增加,缝内区域不考虑启动压力梯度,动用主要集中在横向,造成纵向动用半径减小。由图 8b 可见,随着半缝长的增长,纵向最大动用半径减小。

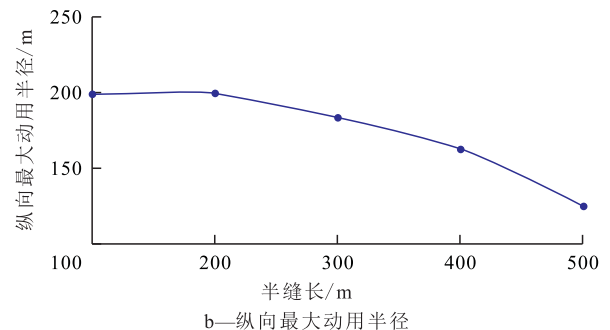
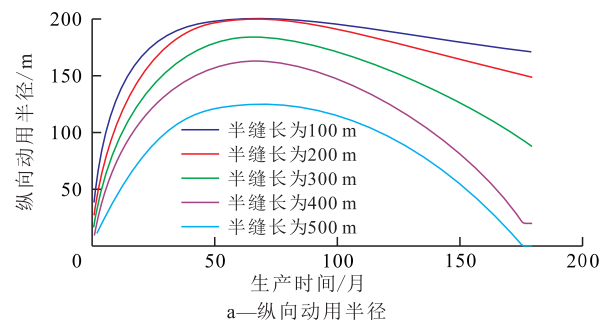


图8 不同半缝长下的纵向动用半径变化规律

Fig.8 Variation of vertical drainage radius with hydraulic fracture half-length

### 3.2.3 缝网宽

在相同生产时间下,纵向动用半径随缝网宽增大而增大,而且缝网宽对纵向动用半径的影响较大,当缝网宽为20 m时纵向最大动用半径才80多米,而当缝网宽为80 m时,纵向最大动用半径为250 m(图9)。缝网宽对纵向动用半径的影响随着缝网宽的增大而减小。

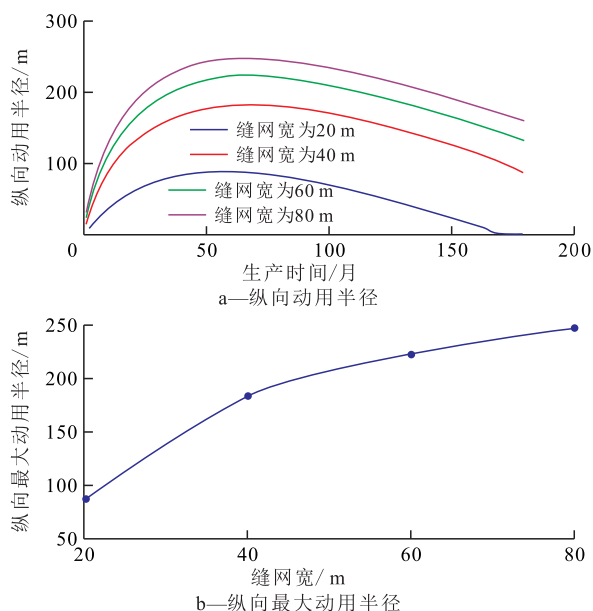


图9 不同缝网宽下的纵向动用变化规律

Fig.9 Variation of vertical drainage radius with fracture network width

## 4 结论

致密油藏由于储层致密,注水开发比较困难,在开发初期及较长的一段时间内一般采用压裂水平井进行衰竭开发。但是由于致密油藏的特点,基质中流动存在启动压力梯度,当压力梯度大于该值时才有流体的流动。在致密油藏体积压裂水平井开发中,水平井段长度、半缝长、缝网宽的影响较大。在不同参数情况下,水平井开发的动用规律为:存在封闭边界时,随着开发时间的增加,动用半径先增大后减小;随着水平井段长度的增加,纵、横向动用半径越来越大,但是相对变化幅度很小。半缝长对纵、横向的动用半径影响不一样,随着半缝长的增加,横向动用半径越来越大,但横向基质最大动用半径越来越小;纵向动用半径越来越小。随着缝网宽的增加,纵、横向动用半径越来越大,但变化幅度越来越小。

### 符号解释:

$v$ ——渗流速度,cm/s; $p$ ——目前地层压力,MPa; $r$ ——

地层中任一点到井底距离,m; $G$ ——启动压力梯度,MPa/m; $K$ ——渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; $\mu$ ——流体粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; $y_w$ ——裂缝中心 $y$ 方向坐标; $y_f$ ——裂缝宽度,m; $x_w$ ——裂缝中心 $x$ 方向坐标; $x_f$ ——裂缝长度,m; $\eta$ ——导压系数, $\text{cm}^2/\text{s}$ ; $t$ ——渗流时间,s; $p_e$ ——原始地层压力,MPa; $r_w$ ——井筒半径,m; $Q$ ——油井产量, $\text{cm}^3/\text{s}$ ; $B$ ——流体体积系数; $m^3/\text{m}^3$ ; $h$ ——油藏厚度,m; $R(t)$ —— $t$ 时刻压裂区外边界,m; $\phi$ ——孔隙度; $c$ ——综合压缩系数, $\text{Pa}^{-1}$ ; $Ei$ ——指数积分; $x$ ——任一点处 $x$ 方向坐标; $\delta$ ——压力函数,MPa; $r_{xy}$ ——地层中任一点到条带源的距离,m; $y$ ——任一点处 $y$ 方向坐标,m; $r_x$ —— $x$ 方向距条带源的距离,m; $r_y$ —— $y$ 方向距条带源的距离,m; $k$ ——裂缝数, $k=1,2,\dots,N$ ; $Q_{k,i}$ ——第 $k$ 条裂缝历史流量, $\text{cm}^3/\text{s}$ ; $x_k$ ——第 $k$ 条裂缝 $x$ 方向坐标; $y_k$ ——第 $k$ 条裂缝 $y$ 方向坐标; $r_{x,k}$ ——任选一点距第 $k$ 条裂缝 $x$ 方向的距离,m; $r_{y,k}$ ——任选一点距第 $k$ 条裂缝 $y$ 方向的距离,m; $i$ ——渗流时刻, $i=1,2,\dots,n$ ; $Q_{k,i}$ ——第 $k$ 条裂缝 $i$ 时刻流量, $\text{cm}^3/\text{s}$ ; $\Delta p$ ——压力差,MPa; $A$ ——渗流面积, $\text{cm}^2$ ; $p_{k,n}$ ——第 $k$ 条裂缝 $n$ 时刻压力值,MPa; $p_w$ ——水平井井底压力,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] 时保宏,郑飞,张艳,等.鄂尔多斯盆地延长组长7油层组石油成藏条件分析[J].石油实验地质,2014,36(3):285-290.  
Shi Baohong, Zheng Fei, Zhang Yan, et al. Hydrocarbon accumulation conditions of Chang7 section, Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 285-290.
- [3] 王磊,李克文,赵楠,等.致密油储层孔隙度测定方法[J].油气地质与采收率,2015,22(4):49-53.  
Wang Lei, Li Kewen, Zhao Nan, et al. Methods research of porosity determination for tight oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 49-53.
- [4] 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.
- [5] 朱耀耀,刘今子,宋洪庆,等.低/特低渗透油藏非达西渗流有效动用计算方法[J].石油学报,2010,31(3):452-457.  
Zhu Weiyao, Liu Jinzi, Song Hongqing, et al. Calculation of effective startup degree of non-Darcy flow in low or ultra-low permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 452-457.
- [6] 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.
- [7] 郝斐, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏启动压力梯度研究[J]. *西南石油学院学报*, 2006, 28(6): 29-32.
- Hao Fei, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. Study on threshold pressure gradient in ultra-low permeability reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(6): 29-32.
- [8] 罗宪波, 李波, 刘英, 等. 存在启动压力梯度时储层动用半径的确定[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(4): 248-250.
- Luo Xianbo, Li Bo, Liu Ying, et al. The determination of drainage radius for reservoirs with a start-up pressure gradient [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21(4): 248-250.
- [9] 刘英宪, 高红立, 张俊, 等. 非均质低渗油藏压裂井产能及动用半径研究[J]. *复杂油气藏*, 2012, 5(3): 53-55.
- Liu Yingxian, Gao Hongli, Zhang Jun, et al. Study on productivity and drainage radius of fractured wells in low-permeability heterogeneous reservoir [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2012, 5(3): 53-55.
- [10] 陈民锋, 李晓风, 赵梦盼, 等. 启动压力影响下确定油藏有效动用半径[J]. *断块油气田*, 2013, 20(4): 462-465.
- Chen Minfeng, Li Xiaofeng, Zhao Mengpan, et al. Determination of effective drainage radius for reservoirs considering threshold pressure gradient [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(4): 462-465.
- [11] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 125-170.
- Li Daopin. The development of the low permeability sandstone oil-field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 125-170.
- [12] 徐轩, 胡勇, 田姗姗, 等. 低渗致密气藏气相启动压力梯度表征及测量[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(4): 78-81.
- Xu Xuan, Hu Yong, Tian Shanshan, et al. Characterization and measurement of starting pressure gradient of gas phase in low-permeability tight gas reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(4): 78-81.
- [13] 李媛媛, 胡向阳, 姚清芳, 等. 大古67块特低渗透油藏开发探索与实践[J]. *石油地质与工程*, 2011, 25(4): 56-58.
- Li Yuanyuan, Hu Xiangyang, Yao Qingfang, et al. Exploration and practice of ultra-low permeability reservoir development of Da-gu67 block [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2011, 25(4): 56-58.
- [14] Qin G, Chen R, Gong B. Data-driven Monte Carlo simulations in estimating the Stimulated Reservoir Volume (SRV) by hydraulic fracturing treatments [R]. SPE 154537, 2012.

编辑 刘北羿

## 欢迎订阅《大庆石油地质与开发》

《大庆石油地质与开发》是经新闻出版广电总局批准,由中国石油天然气集团公司主管、大庆油田有限责任公司主办,面向国内外公开发行的石油天然气类科技期刊,国际标准连续出版物号为ISSN 1000-3754,国内统一连续出版物号为CN 23-1286/TE。

《大庆石油地质与开发》创刊于1982年,设有石油地质、油藏工程、三次采油、地球物理和非常规油气等栏目,主要报道国内外油田、高校和科研机构在石油勘探开发新理论、新工艺、新方法及现场试验、现场应用等方面的科技创新成果。

《大庆石油地质与开发》是中文核心要目总览收录期刊、中国学术期刊和中国期刊方阵双效期刊,是美国《石油文摘》、《化学文摘》、美国地质文献信息系统收录期刊和中国科学引文数据库、中国核心期刊数据库收录期刊,多次荣获黑龙江省政府出版奖、中国北方优秀期刊奖和中国石油优秀科技期刊奖。

《大庆石油地质与开发》为双月刊,大16开本,176页,逢双月1日出版发行,每期定价28元,全年168元。国外发行代号为BM5637,国内发行代号为14-105。欢迎广大读者通过邮局订阅。

编辑部发行服务电话:0459-5508369

编辑部发行服务E-mail: fuyouchun@petrochina.com.cn