

低、特低渗透油藏压裂水平井产能计算方法

王志平¹⁾✉ 朱维耀¹⁾ 岳明¹⁾ 高英¹⁾ 赵光杰²⁾ 王海庆³⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 大庆油田有限责任公司第一采油厂, 大庆 163453

3) 川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 s00504 队, 长庆 745113

✉ 通信作者, E-mail: wangzhiping1981@126.com

摘 要 考虑低、特低渗透油藏裸眼压裂水平井流体从基质-裂缝-水平井筒及基质-水平井筒的耦合流动, 以等值渗流阻力法及叠加原理为基础, 将裸眼压裂水平井渗流区域划分为三个流动区域: 流体在水平井压裂裂缝内的达西线性流动区域、水力压裂裂缝泄流引起的非达西椭圆渗流区域和流体在地层中的径向渗流区域。建立裸眼水平井水力压裂多条横向裂缝相互干扰的非达西产能预测模型, 分析水力裂缝参数对产能影响, 揭示裸眼压裂水平井开采变化规律。模拟结果表明: 裂缝条数越多, 裂缝干扰越强, 水平井压裂存在一最优裂缝条数; 裂缝沿水平井筒排布靠近两端、中间相对较稀, 且两端长、中间短的开发效果最好。

关键词 水平井; 水力压裂; 低渗透油藏; 产量; 计算方法

分类号 TE348

A method to predict the production of fractured horizontal wells in low/ultra-low permeability reservoirs

WANG Zhi-ping¹⁾✉, ZHU Wei-yao¹⁾, YUE Ming¹⁾, GAO Ying¹⁾, ZHAO Guang-jie²⁾, WANG Hai-qing³⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) No. 1 Oil Production Company, Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163453, China

3) s00504 Team, Changqing Underground Technology Operating Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., Changqing 745113, China

✉ Corresponding author, E-mail: wangzhiping1981@126.com

ABSTRACT In consideration of the matrix-crack-wellbore coupling flow and matrix-wellbore coupling flow in an open-hole fractured horizontal well in low/ultra-low permeability reservoirs, mathematical models were derived on the basis of the equivalent flowing resistance method and the superposition principle. For an open-hole fractured horizontal well, the flow field was divided into three regions according to the different flow mechanism: Darcy flow in artificial fractures, low-velocity non-Darcy elliptical flow in the matrix around artificial fractures, and low-velocity non-Darcy plane radial flow in the peripheral matrix. A non-Darcy analytical productivity equation for an open-hole fractured horizontal well was obtained considering mutual interference between multi-transverse fractures. The influences of hydraulic fracture parameters on oil production were analyzed, which reveals the variation in development of an open-hole fractured horizontal well. Numerical results show that the more the artificial fractures, the stronger the interference of artificial fractures, and consequently there exists an optimal quantity of artificial fractures. It is suggested that the artificial-fracture distribution should be dense at two ends of the wellbore and sparse in the middle of the wellbore; in addition, the length of artificial fractures at the two ends should be larger than that in the middle.

KEY WORDS horizontal wells; hydraulic fracturing; low permeability reservoirs; production; computational methods

低、特低渗透油气藏储层物性差, 非均质严重, 仅采用水平井开发往往达不到所预期的开发效果, 为此常常进行水力压裂产生多条裂缝以增加水平井的产能。尽管目前有关压裂水平井的文章很多, 但大多未考虑流体在低渗透储层渗流的特殊性, 即存在启动压力梯度^[1-10], 并且在推导公式的过程中大

收稿日期: 2011-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872027); 国家科技重大专项(2011zx05051)

都进行了一定程度的简化和近似,未考虑水力压裂缝间的相互干扰问题^[5-6,8-9,11-17],因而并不能准确反映流体流到水平井中的实际流动状态。本文以等值渗流阻力法、叠加原理为基础,对裸眼压裂水平井产能预测公式进行了推导,充分考虑了裂缝内存在渗流阻力和压力损失这一实际问题,并对裂缝条数、裂缝半长及裂缝间距等参数对压裂水平井产量的影响进行了分析和对比,从而使新的产量预测公式更具有实际应用价值。

1 压裂水平井产量预测模型

1.1 模型假设

在建立压后水平井产量预测模型之前,作如下假设:(1) 储层为上下封闭且无限大均质地层;(2) 水平井井筒为裸眼完井,依赖水平井裸眼井段和水力压裂裂缝生产;(3) 油藏和裂缝内流体为单相流体,不可压缩,渗流为等温稳定渗流,不考虑重力的影响;(4) 裂缝完全穿透产层,裂缝高度等于油层厚度;(5) 裂缝是垂直于水平井筒的横向裂缝并与井眼对称;(6) 流体一部分沿裂缝壁面均匀的流入裂缝,再经裂缝流入水平井井筒,另一部分沿地层直接渗流入水平井筒。

1.2 模型建立

当裸眼水平井压裂为多条横向裂缝时,地层流体流向压裂水平井的三维流动可划分为两个二维流场的组合。一为考虑裂缝影响的渗流区域,即横向裂缝在水平面内泄流形成的椭圆泄流区及垂直平面内沿裂缝向水平井筒的流动区;二指水平井筒内泄流未受裂缝影响的区域。流场简化示意图如图1所示。

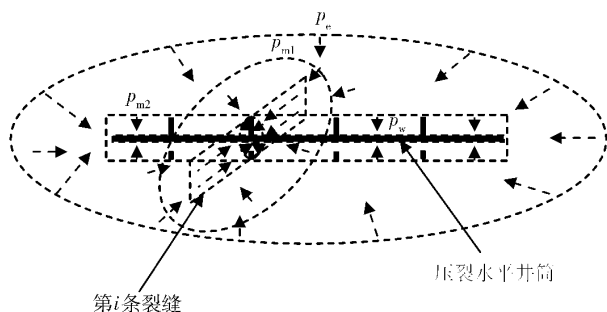


图1 压裂水平井流场简化示意图

Fig. 1 Simplified schematic of the flow field of a fractured horizontal well

1.2.1 压裂水平井考虑裂缝影响的渗流区域产量模型

依据前人对垂直裂缝地层流体渗流规律的研究^[13]将压裂水平井压裂裂缝渗流区域划分为水平

面内的椭圆渗流区和垂直平面内的线性流动区与径向流动区组合。

(1) 非达西椭圆流动区。椭圆流动区边界地层与裂缝边缘交界面处的压力设为 p_{m1} 。任一横向裂缝在水平面内泄流形成的椭圆泄流区渗流阻力为

$$R_1 = \frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{a_i + \sqrt{a_i^2 + x_{fi}^2}}{x_{fi}}$$

低渗透储层考虑启动压力梯度存在的影响,由水电相似原理,得到水平井压裂裂缝为横向裂缝时外部流场的产量为

$$q_1 = \frac{p_e - p_{m1} - G \left(\frac{a_i + \sqrt{a_i^2 - x_{fi}^2}}{2} - \frac{x_{fi}}{2} \right)}{\frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{a_i + \sqrt{a_i^2 - x_{fi}^2}}{x_{fi}}} \quad (1)$$

式中: x_{fi} 为任一水力压裂裂缝半长, m; a_i 为任一水力裂缝泄流形成椭圆长半轴, m; p_e 为地层边界压力, MPa; G 为启动压力梯度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$, $G = \alpha \cdot k^\beta$, 其中 α, β 为拟合系数, 文中 $G = 0.0625 \cdot k^{-0.912}$; h 为地层有效厚度, m; k 为地层有效渗透率, μm^2 ; μ 为黏度, $\text{MPa} \cdot \text{s}$; q_1 为非达西椭圆渗流区产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(2) 达西线性流动区。垂直平面内沿裂缝向水平井筒的流动区内假设不存在启动压力梯度,流体在裂缝内为线性流动与径向流动组合,均服从达西定律,流场示意图见图1。裂缝内线性流动区与径向流动区交界面处压力设为 p_{m2} 。以任一条横向裂缝为例建立坐标系,横向裂缝与水平井筒交点坐标为 $(0, 0)$, 裂缝尖端边界处坐标为 $(0, x_{fi})$, 建立垂直平面内流体沿裂缝流向井筒的产量公式。水力裂缝内线性流动区运动方程为

$$v = \frac{q_2}{A} = \frac{q_2(x_{fi} - x)}{2x_{fi}w_{fi}h} = -\frac{k_{fi}dp}{\mu dx}$$

代入边界条件 $x = h/2$ 时 $p = p_{m2}$, $x = x_{fi}$ 时 $p = p_{m1}$, 并在 $h/2 \leq x \leq x_{fi}$ 范围内积分,

$$\int_{p_{m2}}^{p_{m1}} dp = \frac{\mu}{k_{fi}} \int_{h/2}^{x_{fi}} \frac{q_2(x_{fi} - x)}{2x_{fi}w_{fi}h} dx,$$

整理得

$$q_2 = \frac{p_{m1} - p_{m2}}{\frac{\mu x_{fi}}{4k_{fi}w_{fi}h}} \quad (2)$$

其中: p_{m2} 为裂缝内线性流动区与径向流动区交界面处压力, MPa; x 为水力压裂裂缝内任意一点坐标, m; w_{fi} 为任一水力压裂裂缝宽度, m; k_{fi} 为任一水力压裂裂缝内渗透率, μm^2 ; p 为地层任一点压力, MPa; q_2 为裂缝内线性流动区产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(3) 径向流动区。压裂裂缝内径向流动区相当于圆形供给半径为 $h/2$, 等效地层厚度为 w_{fi} , 中心井

径为 r_w 的油井生产. 流动区域见图 1. 由达西定律

$$v = \frac{q_3}{2\pi r \cdot w_{fi}} = \frac{k_{fi} dp}{\mu dr},$$

代入边界条件 $r = r_w$ 时 $p = p_w$, $r = h/2$ 时 $p = p_{m2}$, 并在 $r_w \leq r \leq h/2$ 范围内积分, 得

$$\int_{p_w}^{p_{m2}} dp = \frac{\mu}{k_{fi}} \int_{r_w}^{h/2} \frac{q_3}{2\pi r w_{fi}} dr,$$

整理得

$$q_3 = \frac{p_{m2} - p_w}{\frac{\mu}{2\pi k_{fi} w_{fi}} \ln \frac{h/2}{r_w}} \quad (3)$$

式中: r_w 为生产井井筒半径, m; p_w 为生产井井底流压, MPa; q_3 为裂缝内径向流动区产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.

根据等值渗流阻力法, 各个流场串联供油, $q_1 = q_2 = q_3 = q_{fi}$, 交界面处压力相等, 消去 p_{m1} 和 p_{m2} , 得到低渗透储层考虑启动压力梯度下水平井压裂为单条

$$q_{fi} = \frac{p_e - p_w - G \left(\frac{a_i + \sqrt{a_i^2 - x_{fi}^2}}{2} - \frac{x_{fi}}{2} \right)}{\left(1 - \frac{S_i}{\pi a_i b_i} \right) \frac{\mu}{2\pi k h} \ln \frac{a_i + \sqrt{a_i^2 - x_{fi}^2}}{x_{fi}} + \frac{\mu x_{fi}}{4k_{fi} w_{fi} h} + \frac{\mu}{2\pi k_{fi} w_{fi}} \ln \frac{h/2}{r_w}} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

其中: S_i 为水平井压裂多条裂缝时, 任意两条裂缝间的干扰面积, m^2 ; q_{fi} 为水平井单条裂缝产液量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; n 为水平井水力压裂裂缝条数.

1.2.2 压裂水平井未考虑裂缝影响的渗流区域产量模型

地层基质向水平井筒渗流可等效为矩形箱体.

如图 1 所示, 箱体截面长为 $D = \sum_{i=1}^n 2x_{fi}/n$, 宽为 h

的矩形, 它与半径为 $\sqrt{\frac{Dh}{\pi}}$ 的圆形等效, 水平井中间

压裂时, 水平井筒泄流未受裂缝影响的段数为 $N = n + 1$; 水平井两端压裂时, 水平井筒泄流未受裂缝影响的段数为 $N = n - 1$. 未受影响的每段井筒长为 W_i ,

每段泄流相当于供给半径为 $\sqrt{\frac{Dh}{\pi}}$ 井径为 r_w 以及地层厚度为 W_i 的圆形地层泄流, 此时每段的产量公式为

$$q_{mi} = \frac{p_e - p_w - G \left(\sqrt{\frac{Dh}{\pi}} - r_w \right)}{\frac{\mu}{2\pi k W_i} \ln \frac{\sqrt{\frac{Dh}{\pi}}}{r_w}}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

由水电相似准则, 裂缝与基质并联供油, 考虑多条裂缝泄流区域相互干扰, 得到低渗透储层裸眼压裂水平井考虑多条裂缝泄流区域相互干扰的产量预测模型为

横向缝时产量公式:

$$q_{fi} = \frac{p_e - p_w - G \left(\frac{a_i + \sqrt{a_i^2 - x_{fi}^2}}{2} - \frac{x_{fi}}{2} \right)}{\frac{\mu}{2\pi k h} \ln \frac{a_i + \sqrt{a_i^2 - x_{fi}^2}}{x_{fi}} + \frac{\mu \cdot x_{fi}}{4k_{fi} \cdot w_{fi} h} + \frac{\mu}{2\pi k_{fi} w_{fi}} \ln \frac{h/2}{r_w}} \quad (4)$$

当水平井压裂为多条横向裂缝时, 各条裂缝形成的泄流区域互相干扰. 设任意两条裂缝泄流形成的椭圆区域相交, 相交的公共面积为 S_i , 由等值渗流阻力法可知, 当两椭圆泄流区域相交时, 相当于减少了该区域的渗流阻力, 同时对启动压力损耗方面也有影响, 而裂缝内流体流动的流动阻力不受影响. 由水电相似准则及等值渗流阻力法, 得到考虑多条裂缝泄流区域相互干扰时任一条裂缝的产量为:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_{fi} + \sum_{i=1}^N q_{mi}. \quad (7)$$

其中: D 为等效箱体截面矩形长, m; N 为未受压裂裂缝影响水平井段数; W_i 为未受压裂裂缝影响水平井段长, m; q_{mi} 为未受压裂裂缝影响水平井段产液量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; Q 为水平井产液量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.

2 压裂水平井产量影响参数分析

某试验区模拟初始条件: 地层平均渗透率为 $1.69 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均孔隙度为 14%, 地层有效厚度 8 m, 地层原始压力 35.76 MPa, 地层饱和压力 25 MPa. 地层原油黏度 1.29 MPa·s, 地层水黏度 0.8 MPa·s, 地面原油密度 $0.853 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 原油体积系数 1.2, 束缚水饱和度 0.416, 残余油饱和度 0.24, 最大含水饱和度 0.76, 最大含油饱和度 0.584. 生产井井底流压 23 MPa. 水平井水平段长 300 m, 等间距压裂三条裂缝, 裂缝半长 120 m. 初始压裂宽度 0.003 m, 裂缝渗透率 $50 \mu\text{m}^2$, 裂缝导流能力 15 D·cm. 最大主应力方向为 NE68°.

2.1 本文模型的优越性

对本文建立产能模型与其他产能预测方法进行对比, 各模型采用参数均相同为初始条件.

从图 2 中对比可以看出, 在实际储层参数基础上, 采用 eclipse 软件或运用郎兆新的方法^[11]模拟的产量均高于油井实际产量, 而本文建立的产量预测模型预测的结果与实际油井产量吻合较好. 这是

由于 eclipse 软件适用于中高渗透油藏, 没有低渗透储层流体渗流规律, 即未考虑非达西渗流特征; 而郎兆新的方法计算时未考虑低渗透储层非达西效应, 在压裂水平井多条裂缝渗流时尽管也采用等值渗流阻力方法, 但未考虑多条裂缝渗流相互干扰问题; 本文建立的压裂水平井渗流数学模型, 考虑了压裂水平井在低渗透储层渗流存在启动压力梯度, 压裂多条裂缝, 裂缝间存在相互干扰耦合渗流的特征, 同时考虑影响因素全面, 适用于低、特低渗透油藏压裂水平井产量预测。

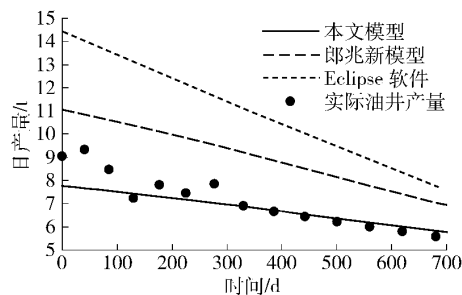


图2 本文模型与其他方法对比

Fig. 2 Comparison of the model with other methods

2.2 裂缝半长对水平井产量的影响

水平井水平段长 300 m, 等间距压裂三条裂缝, 裂缝沿水平井筒对称分布, 裂缝长度不同对水平井产量影响明显。从图 3 模拟对比中可以看出, 压裂裂缝半长沿水平井分布两端长中间短 150、100 和 150 m 时油井产量高于压裂裂缝分布为两端短中间长 100、150 和 100 m 的产量。裂缝半长均为 80 m 的油井产量低于裂缝半长均为 120 m 的产量, 可见裂缝长度增大, 扩大了流体椭圆渗流区域, 降低了流体流动阻力, 使得油井的产量增加。本例优选压裂水平井压裂裂缝沿水平井排布两端长, 中间短的裂缝排布方式为最优开发方式。

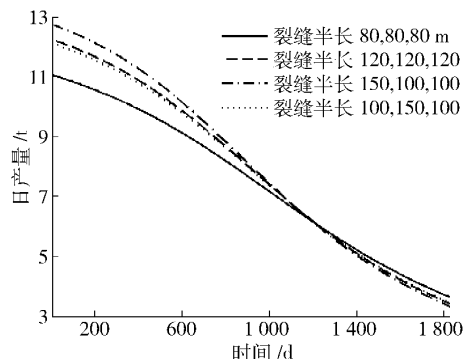


图3 水平井压裂裂缝半长对油井产量的影响

Fig. 3 Influence of the half length of fractures on oil production

2.3 裂缝条数对产量的影响

图 4 显示了裂缝条数对压裂水平井开发效果的

影响, 随着裂缝条数的增加, 水平井开发采出程度增大。初始时, 裂缝条数由三条增加到四条, 采出程度增大幅度较大; 裂缝条数增加到五条时, 采出程度增大幅度减小; 当裂缝条数增加到六条时, 油井产量反而降低。这是因为随着裂缝条数的增加, 各条裂缝之间产生的相互干扰也比较严重, 使得每条裂缝的产量减小, 所以随着裂缝条数的增多, 产量增加的量越来越小; 裂缝条数较多时, 裂缝间干扰程度加大, 反而降低了开发效果。水平井压裂存在一个最优裂缝条数, 本文水平井 300 m 长, 优选裂缝条数五条。

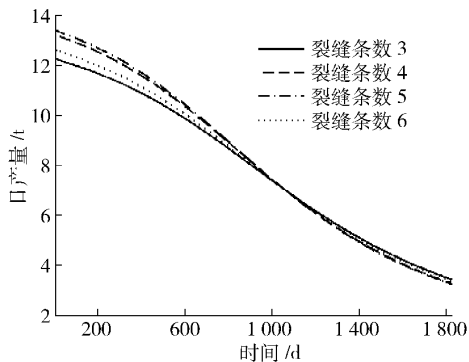


图4 裂缝条数对油井产量影响

Fig. 4 Influences of fracture quantities on oil production

2.4 裂缝位置对产量的影响

裸眼水平井水力压裂, 裂缝的存在降低了流体渗流阻力, 扩大流体渗流区域。以水平井根部为零点, 当裂缝距水平井根部的位置分别为 50、150 和 250 m 时, 裂缝间泄流未产生干扰, 同时, 流体从地层直接向水平井筒未受裂缝影响区渗流, 使得水平井泄流区域最大, 油井产量最高; 压裂裂缝集中在水平井筒中间 (100、150 和 200 m) 和 (75、150 和 225 m) 时, 由于裂缝间距较小, 裂缝间渗流产生干扰, 距离越近, 干扰越严重, 油井产量越小。裂缝距水平井根部的位置分别为 0、150 和 300 m, 裂缝未产生相互干扰, 但流体从地层直接流向水平井筒的产量减小, 水平井产量居中。本文优选水平井压裂裂缝位置为 50、150 和 250 m。

3 结论

(1) 运用本文建立的压裂水平井多条横向裂缝相互干扰的产量预测模型进行油井产量预测, 能够充分考虑开发过程中流体由储层流向裂缝, 经过裂缝间相互干扰渗流, 最后经裂缝流向水平井的多场耦合流动, 考虑因素全面, 符合实际开发规律, 能够很好地应用于低渗透油藏压裂水平井产量预测。

(2) 数值模拟结果表明: 随着裂缝条数的增多, 油井采出程度增大, 裂缝条数越多, 采出程度增大幅

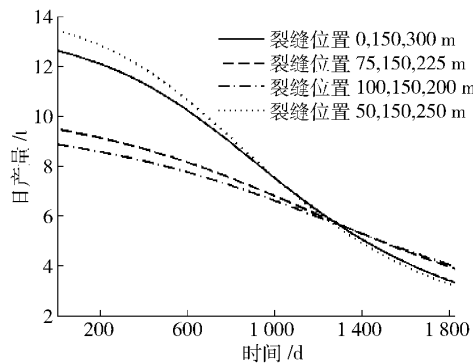


图5 裂缝位置对油井产量影响

Fig. 5 Influences of fractures location on oil production

度越小,当裂缝增加到一定条数,裂缝间渗流产生干扰,降低水平井产量.水平井压裂存在一最优裂缝条数.本文水平井水平段长300 m,最优裂缝条数为五条;水平井压裂裂缝长度增大,油井采出程度增加,压裂水平井压裂裂缝沿水平井筒排布两端长、中间短的开发效果最好.

(3) 裸眼水平井压裂既要考虑地层基质向水平井筒的直接渗流,又要考虑压裂裂缝间相互干扰情况.压裂裂缝越集中,裂缝间相互干扰越严重.本文优选水平井压裂裂缝距水平井根部的位置为50、150和250 m.

参 考 文 献

- [1] Zhao Z F, Wu X D, Huang W, et al. Influencing factor analysis of the productivity of fractured horizontal wells in ultra-low permeability reservoir. *Oil Drill Prod Technol*, 2011, 33(4): 81
(赵振峰, 吴晓东, 黄伟, 等. 特低渗透油藏压裂水平井产能影响因素分析. *石油钻采工艺*, 2011, 33(4): 81)
- [2] Zeng B Q, Cheng L S, Li C L, et al. Development evaluation of fractured horizontal wells in ultra-low permeability reservoirs. *Acta Pet Sin*, 2010, 31(5): 791
(曾保全, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏压裂水平井开发效果评价. *石油学报*, 2010, 31(5): 791)
- [3] Yuan S, Li C L, Zeng B Q, et al. Experimental study on optimization of fracture parameters in horizontal well fracturing. *Pet Drill Tech*, 2010, 38(4): 99
(袁帅, 李春兰, 曾保全, 等. 压裂水平井裂缝参数优化实验. *石油勘探技术*, 2010, 38(4): 99)
- [4] Zhang F X, Wu X D, Sui X F, et al. Study on fractured horizontal well productivity for low-permeability reservoirs based on electric analogy. *Spec Oil Gas Reserv*, 2009, 16(2): 90
(张凤喜, 吴晓东, 隋先富, 等. 基于电模拟实验的低渗透油藏压裂水平井产能研究. *特种油气藏*, 2009, 16(2): 90)
- [5] Zhang X B, Luo Y, Wang S P, et al. A new optimization design method of integral fracturing on the basis of the equivalent percolating resistance theory. *Inner Mongolia Petrochem Ind*, 2007(11): 280
(张小波, 罗勇, 王树平, 等. 等值渗流阻力法在整体压裂优化设计计算中的应用. *内蒙古石油化工*, 2007(11): 280)
- [6] Li T L, Li C L, Wu Y, et al. New way to calculate fractured horizontal wells productivity in low permeability oil reservoirs. *J China Univ Pet*, 2006, 30(2): 48
(李廷礼, 李春兰, 吴英, 等. 低渗透油藏压裂水平井产能计算新方法. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(2): 48)
- [7] Xu Y B, Qi T, Yang F B, et al. New model for productivity test of horizontal well after hydraulic fracturing. *Acta Pet Sin*, 2006, 27(1): 89
(徐严波, 齐桃, 杨凤波, 等. 压裂后水平井产能预测新模型. *石油学报*, 2006, 27(1): 89)
- [8] Mu Z B, Yuan X C, Zhu X M. The calculating method of horizontal wells with hydraulic fractures for low permeability reservoirs. *Geoscience*, 2009, 23(2): 337
(牟珍宝, 袁向春, 朱筱敏. 低渗透油藏压裂水平井产能计算方法. *现代地质*, 2009, 23(2): 337)
- [9] Ding Y P, Wang X D, Xing J. A method of productivity calculation for fractured horizontal well. *Spec Oil Gas Reserv*, 2008, 15(2): 64
(丁一萍, 王晓冬, 邢静. 一种压裂水平井产能计算方法. *特种油气藏*, 2008, 15(2): 64)
- [10] Han T, He S L, Tian S B. A New Method to Predict Production of fractured horizontal well with multi-cracks. *Inner Mongolia Petrochem Ind*, 2008(19): 101
(韩涛, 何顺利, 田树宝. 油藏多裂缝压裂水平井压后产能预测方法. *内蒙古石油化工*, 2008(19): 101)
- [11] Lang Z X, Zhang L H, Cheng L S. Investigation on productivity of fractured horizontal well. *J Univ Pet*, 1994, 18(2): 43
(郎兆新, 张丽华, 程林松. 压裂水平井产能研究. *石油大学学报: 自然科学版*, 1994, 18(2): 43)
- [12] Wang L J, Zhang X H, Ma N, et al. Production prediction for fractured horizontal wells as fractures at any angle to wellbore. *Pet Geol Recovery Effic*, 2008, 15(6): 73
(王立军, 张晓红, 马宁, 等. 压裂水平井裂缝与井筒成任意角度时的产能预测模型. *油气地质与采收率*, 2008, 15(6): 73)
- [13] Liu C Q. The flow of fluid through porous media with a vertical fracture. *Pet Explor Dev*, 1987(3): 69
(刘慈群. 垂直裂缝地层中流体的渗流. *石油勘探与开发*, 1987(3): 69)
- [14] Lei Z D, Cheng S Q, Li X F, et al. A new method for prediction of productivity of fractured horizontal wells based on non-steady flow. *J Hydrodyn Ser B*, 2007, 19(4): 494
- [15] Crosby D G, Rahman M M, Rahman M K, et al. Single and multiple transverse fracture initiation from horizontal wells. *J Pet Sci Eng*, 2002, 35(3/4): 191
- [16] Zeng F h, Zhao G. The optimal hydraulic fracture geometry under non-Darcy flow effects. *J Pet Sci Eng*, 2010, 72(1/2): 143
- [17] Nashawi I S, Malallah A H. Well test analysis of finite-conductivity fractured wells producing at constant bottomhole pressure. *J Pet Sci Eng*, 2007, 57(3/4): 303