

文章编号: 1000-7598(2010)10-3295-06

低渗透油藏菱形反九点压裂井网两相渗流分析

王 明¹, 朱维耀¹, 李继山², 刘 合³, 宋洪庆¹

(1. 北京科技大学 土木与环境学院, 北京 100083; 2. 胜利油田有限责任公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015;

3. 大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163100)

摘 要: 依据低渗透油藏菱形反九点压裂井网不同流动区域的流动规律, 建立了反映压裂开采过程物理本质的三区模型, 推导出了考虑启动压力梯度的基质非达西渗流、椭圆渗流和裂缝非线性流动的三区两相渗流数学模型。研究表明: 裂缝越长, 累积产量越高, 含水率增加越快; 裂缝的导流能力越低, 其累积产量越小, 含水率也越小, 随着导流能力的增加, 累积产量的增加幅度变小; 注水井排与裂缝的夹角对产量的影响不大; 井排距对产量影响明显, 对压裂井应采取较大的井排距。

关 键 词: 低渗透; 菱形反九点井网; 基质-裂缝; 两相渗流; 数学模型

中图分类号: TE 348

文献标识码: A

Two-phase percolation of rhombus inverted nine-spot fracturing well pattern in low permeability oil reservoirs

WANG Ming¹, ZHU Wei-yao¹, LI Ji-shan², LIU He³, SONG Hong-qing¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Company Ltd., Dongying, Shandong 257015, China;

3. Daqing Petroleum Administration Bureau, Daqing, Heilongjiang 163100, China)

Abstract: According to flow characteristics of different flow area of rhombus inverted nine-spot fracturing well pattern in low permeability oil reservoirs, the three districts physical models that reflect physical nature of fracturing performance history have been built. Two-phase porous flow mathematical models of matrix non-Darcy flow with start-up pressure gradient, ellipse flow and fracture nonlinear flow in low permeability oil reservoirs are found. As the result indicates, the cumulative production and water content step up with the increase of fracture half length and flow conductivity; incremental scope of cumulative production decreases with the increase of flow conductivity; inclined angle of fracture and injection well row have a little influence on the cumulative production, and well row spacing influences cumulative production greatly. The major rational well row spacing are strongly recommended when put a hydraulic fracturing well into production.

Key words: low permeability; rhombus inverted nine-spot well pattern; matrix-fracture; two-phase flow; mathematical model

1 引 言

低渗透油田开发是我国大部分油田可持续发展的重点。低渗透油田通常在直井工艺条件下很难进行工业化开采, 压裂是改善该类油田流动控制区、增加油井产量的有效方法。国内外对井组压裂的复杂流动问题研究尚少^[1-7], 以往研究成果几乎没有考虑裂缝中高速非达西规律、低渗透油藏中启动压裂梯度及井网两相渗流问题的影响。这些研究成果^[8-12]不能反映低渗透油田井网压裂复杂的渗流规律。因此, 针对低渗透油田菱形反九点井网压裂油-水两相渗流规律的研究, 对于经济、有效地动用低

渗透油田储量具有实际的指导意义。

2 物理本质

在压裂开采过程中储层与压裂裂缝中的流体具有不同的流动规律, 据此可把菱形反九点井网划分为3个物理区域: I区为人工压裂裂缝内的高速非达西流动区, II区为裂缝控制范围内的椭圆渗流区, III区为远离人工裂缝的基质非达西渗流区。

3 三区耦合油-水两相渗流数学模型

模型的假设: ①地层中油水两相流体不混溶、不可压缩; ②忽略重力和毛管压力的影响; ③地层

收稿日期: 2009-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 10772023); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2007CB209500)。

第一作者简介: 王明, 男, 1978年生, 博士研究生, 主要从事低渗透油藏工程研究工作。E-mail: seasky517@126.com

温度不变,油藏为各向同性均质的。

由于菱形反九点井网的几何对称性,故只需研究井网单元中一个代表性的三角形区域。依据叠加原理即可得到整个井网的渗流规律。

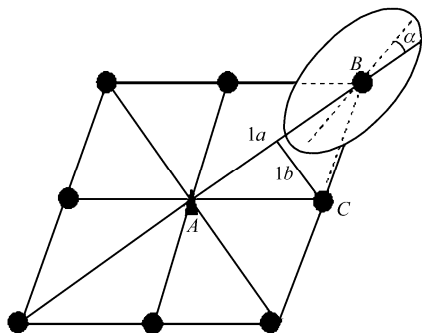


图1 井网单元示意图

Fig.1 Sketch map of pattern unit

3.1 I区: 裂缝中的高速非达西渗流

若裂缝中流量 $Q = 12 \text{ m}^3/\text{d}$, 流体密度 $\rho = 0.84 \text{ g/cm}^3$, 流体黏度 $\mu = 3 \text{ MPa} \cdot \text{s}$, 裂缝渗流 $k = 60 \mu\text{m}^2$, 基质孔隙度 $\phi = 0.20$ 。由米里昂席哥夫推导公式^[12]计算的雷诺数为

$$Re = \frac{\nu \rho}{\mu} \sqrt{\frac{k}{\phi}} = 1.065 \quad (1)$$

Darcy 定律的适用上限为 $Re = 0.022 \sim 0.290$ 。由于裂缝中的雷诺数远大于 Darcy 定律适用上限的雷诺数,因此,裂缝中的流动不再符合 Darcy 定律。本文采用应用最为广泛的二项式高速非线性渗流模型来描述裂缝中的渗流规律^[13]:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} v + \zeta \rho v^2 = \frac{\mu}{k} \frac{Q}{w_f h} + \zeta \rho \left(\frac{Q}{w_f h} \right)^2 \quad (2)$$

式中: ζ 为高速非线性渗流系数; p 为压力; μ 为流体的黏度; k 为基质渗透率; v 为流动速度; ρ 为流体的密度; h 为油层的厚度; w_f 为裂缝的宽度。

$$\zeta = -\frac{1}{[\phi(1-s_w)]^2} \cdot \exp\left\{45 - \sqrt{407 - 81 \ln(k_f / [\phi(1-s_w)])}\right\} \quad (3)$$

式中: ϕ 为孔隙度; k_f 为裂缝的空气渗透率; s_w 为含水饱和度。

3.2 II区: 裂缝控制区域内的椭圆渗流

裂缝控制范围内,压力波以旋转椭球方式传播,该区流动为椭圆渗流。基于扰动椭圆的概念,用发展的矩形族来描述等压椭圆族:

$$\bar{x} = x_f \cosh \xi, \bar{y} = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} b \sin \eta d\eta = \frac{2x_f}{\pi} \sinh \xi \quad (4)$$

式中: x_f 为裂缝的长度。

则II区中的椭圆渗流偏微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left[\frac{k k_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{y}} - G \right) \right] = \phi \frac{\partial s_o}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left[\frac{k k_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{y}} - G \right) \right] = \phi \frac{\partial s_w}{\partial t} \quad (6)$$

式中: k_{ro} 为油相相对渗透率; k_{rw} 为水相相对渗透率; G 为启动压力梯度; s_o 为含油饱和度; μ_o 为油的黏度; μ_w 为水的黏度。

流量公式为

$$Q = 8x_f^2 \sinh \xi \cosh \xi \left[\frac{k k_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{y}} - G \right) \right] \quad (7)$$

式中: ξ 为椭圆外边界。

在三角形内的椭圆流量为椭圆渗流的一部分,即有:

$$a = \frac{Q_t}{Q} = \frac{A_t}{A} \quad (8)$$

式中: A_t 为椭圆落在三角形区域内的面积; Q_t 为落在三角形区域内的椭圆流动的流量; A 为椭圆的面积。

对于菱形反九点井网长对角线上的角井, a 为

$$a = \arccos \left(3l_a / \sqrt{9l_a^2 + 4l_b^2} \right) / \pi \quad (9)$$

短对角线的角井为

$$a = \left[\arccos \left(6l_b / \sqrt{l_a^2 + 36l_b^2} \right) \right] / \pi \quad (10)$$

长对角线上的边井为

$$a = \left[\arccos \left(l_a / \sqrt{l_a^2 + 4l_b^2} \right) - \alpha \right] / \pi \quad (11)$$

短对角线的边井为

$$a = \left[\arccos \left(4l_b / \sqrt{l_a^2 + 4l_b^2} \right) - \alpha \right] / \pi \quad (12)$$

式中: l_a 、 l_b 均为井排距; α 为井排偏转角度。

3.3 III区: 远离人工裂缝的基质非达西渗流

此区内的流体遵循平面径向非定常渗流规律,可简化为只与自变量 r 和 t 有关,而与角度和高度 z 无关的简单情形。渗流偏微分方程可写为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[-k \frac{k_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right) \right] + \bar{Q}_o - \phi \frac{\partial s_o}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[-k \frac{k_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right) \right] + \bar{Q}_w + \phi \frac{\partial s_w}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

式中: $\bar{Q}$ 为源汇项, 可写成:

$$\bar{Q}_0 = \frac{Q}{bh} [1 - f_w] \delta(x - x_B) \delta(y - y_B) \quad (15)$$

$$\bar{Q}_w = \frac{Q_l}{ch} \delta(x) \delta(y) + \frac{Q}{bh} f_w \delta(x - x_B) \delta(y - y_B) \quad (16)$$

式中: Q_l 和 Q 分别为注入井和生产井的体积流量; δ 为 Dirac 函数; f_w 为含水率。因为注入井流入该三角形区域和生产井从该三角形区域流出的流量只是井整个流量的一部分。依据流线分布规律, 流线控制区域内的流量应除以 b 或者 c 。对菱形反九点井网, $b=8$, $c=16$ 。

3.4 定解条件

初始条件为

$$\left. \begin{aligned} p(r=r_w, t=0) &= p_o \\ p(r=l_a, t=0) &= p_w \\ s_w(\xi, 0) &= s_{wc} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: p_o 为油井井底流压; p_w 为水井井底流压; r_w 为井筒半径; s_{wc} 为初始含水饱和度。

内边界条件为

$$s_w(0, t) = 1 - s_{or} \quad (18)$$

式中: s_{or} 为初始含油饱和度。

外边界条件是在三角形的 C 点上压力导数为 0, 即

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_C = 0 \quad (19)$$

交界面条件为

$$p_1 = p_2 \Big|_{x_f = \xi_0}, \quad p_2 = p_3 \Big|_{r = \xi} \quad (20)$$

式中: $r = \sqrt{M^2 \cos^2 \alpha + N^2 \sin^2 \alpha}$, M 、 N 分别为椭圆的长、短轴, $M = x_f \cosh \xi$; $N = x_f \sinh \xi$; ξ_0 为椭圆的内边界。

3.5 油层基质-裂缝耦合流动方程

因为流体在 3 个区域的交界处压力相等, 由式 (1)~(14) 及定解条件可得, 低渗透油层菱形反九点压裂井网产量与压力的关系表达式:

$$\begin{aligned} p_w - p_o - G(r - r_0) - \frac{2x_f G}{\pi} [\sinh \xi - \sinh \xi_0] &= \frac{\mu Q x_f}{k_f w_f h} + \int_0^{x_f} \zeta \rho \left(\frac{Q}{w_f h} \right)^2 dx + \frac{a Q \mu_o}{4 \pi k x_f} \\ &+ \int_{\xi_0}^{\xi} \frac{1}{\sinh \xi} \left[\frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o} \right] d\xi + \\ &+ \frac{Q}{b k \phi A^2} \int_0^t \frac{Q_l}{c} dt \int_{s_{w0}}^{s_{wf}} \frac{f_w''}{\left[\frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o} \right]} ds_w \end{aligned} \quad (21)$$

4 压裂开采影响因素分析

某试验区的数据如下: 油藏平均有效厚度为 7.2 m, 含油饱和度为 0.60, 原油地下黏度为 1.83 MPa·s, 地层水黏度为 0.576 3 MPa·s, 孔隙度为 0.16, 油层平均渗透率为 $7.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 注采压差为 11 MPa, 裂缝半长为 140 m, 裂缝的导流能力为 $0.4 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$, 裂缝宽度为 0.002 m, 井距为 400 m, 排距为 175 m。

4.1 裂缝半长对累积产量和含水率变化的影响

由图 2 可以看出, 在 1 000 d 内累积产量增加较快, 其对应含水率从 0 快速变化到 70% 左右; 在 1 000 d 以后累积产量增加幅度趋于平缓, 对应的含水率增加幅度也变缓。由此可见, 中低含水期为低渗透油田压裂开发的主要采油期。裂缝越长, 累积产量越高, 但其相应含水率增加得越快。

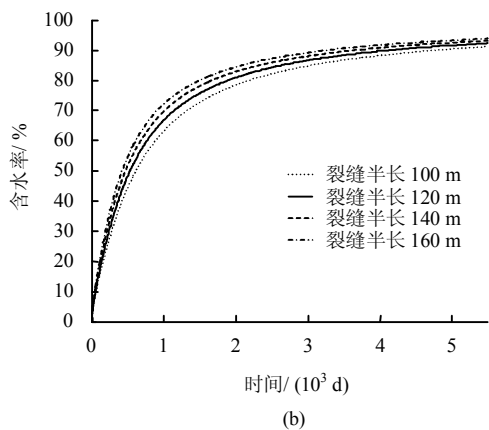
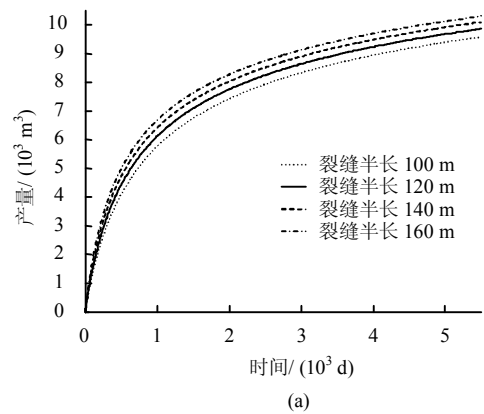


图 2 不同裂缝半长下累积产量、含水率变化曲线
Fig.2 Change of cumulative production and water content at different half fracture length

4.2 井距对产量和含水率变化的影响

由图 3 可知, 在开发初期井距越小, 期累积产量越高, 但其含水率上升速度也越快; 由于大井距的含水率上升速度较慢, 在 1 000 d 左右, 其累积产量逐渐超过小井距。

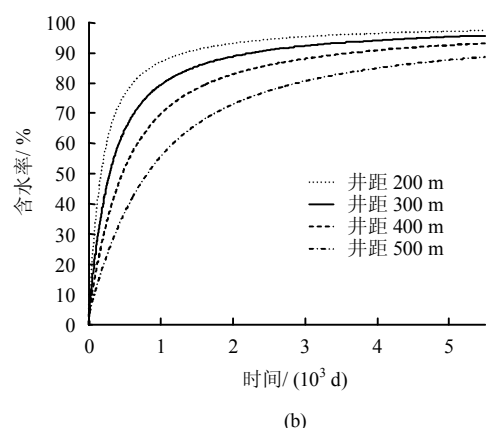
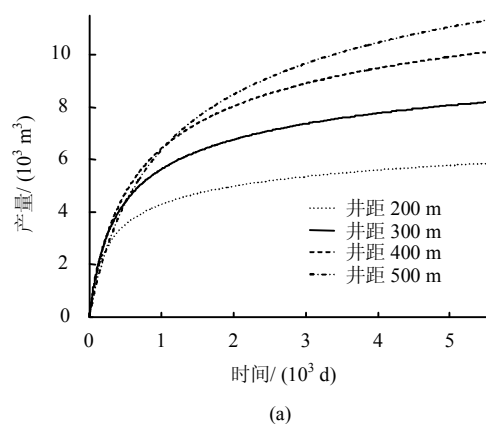


图3 不同井距下累积产量、含水率变化曲线

Fig.3 Change of cumulative production and water content at different well spacing

4.3 排距对累积产量和含水率变化的影响

由图4可知,在压裂开采初期不同排距的累积产量基本相同,但小排距的含水率上升速度要快于大井距;随着开采时间的推移,在600 d左右,大井距的累积产量逐渐超过小井距。在1500 d左右,不同排距的累积产量上升缓慢,基本趋向于一条直线。

4.4 裂缝导流能力的影响

由图5可知,裂缝的导流能力越低,其累积产量越小,含水率也越小。随着导流能力的增加,累积产量的增加幅度变小。因此,应针对不同情况合理优选裂缝的导流能力。在2000 d左右,不同导流能力的累积产量上升缓慢,由此可见,压裂井的有效开发时期主要在开发中前期。

4.5 注水井排与裂缝夹角对产量和含水率变化的影响

由图6可以看出,注水井排偏转角度对油井产量影响不大,仍有一定的规律性。对于角井,初始时,角度越小,在同一含水率下累积产量越高,采出程度越大,随着含水率的增加,在同一含水率下,夹角大的采出程度反而大。

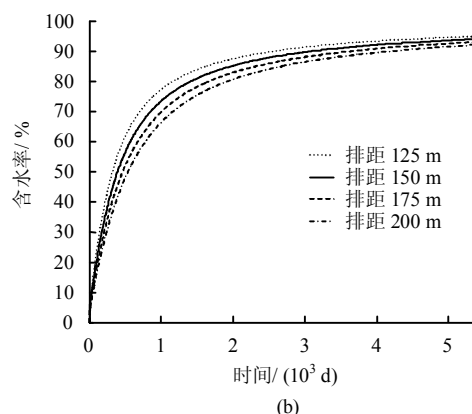
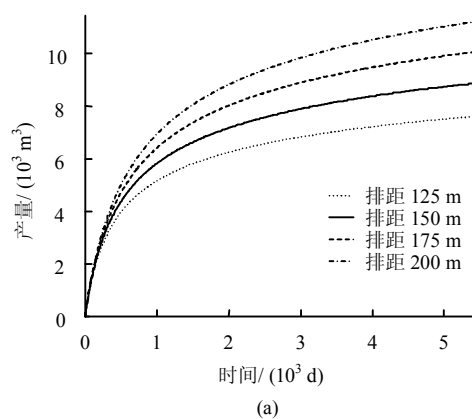


图4 不同排距下累积产量、含水率变化曲线

Fig.4 Change of cumulative production and water content with production time at different row spacing

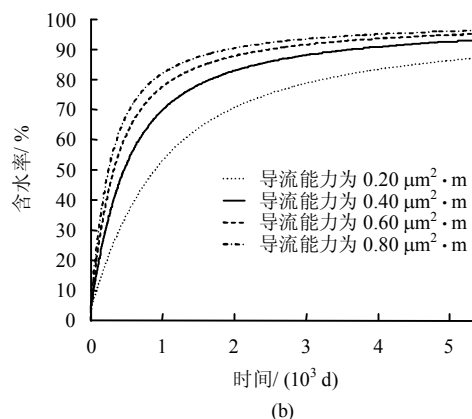
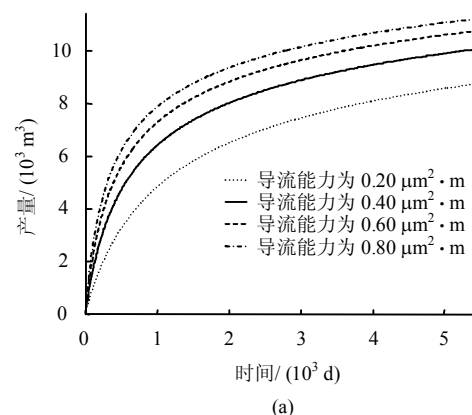


图5 不同裂缝导流能力下累积产量、含水率变化曲线

Fig.5 Change of cumulative production and water content with production time at different fracture flow conductivity

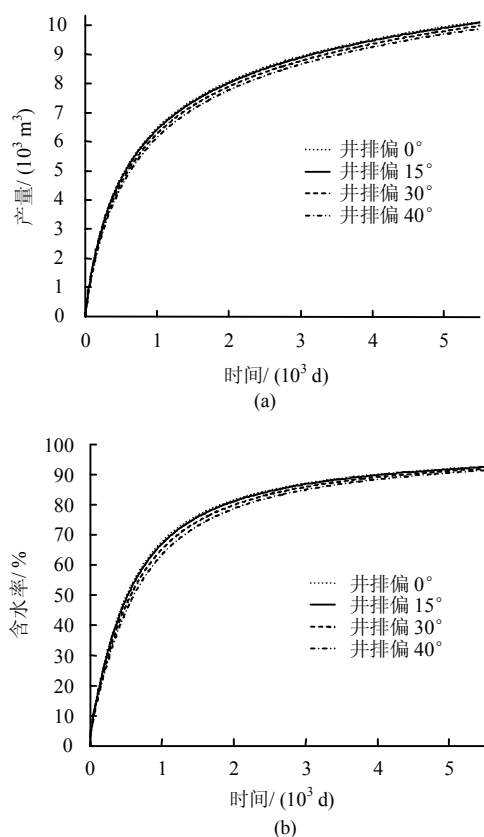


图 6 不同注水井排与裂缝夹角下累积产量、含水率变化曲线
Fig.6 Change of cumulative production and water content at inclined angle of fracture and injection well row

5 结 论

(1) 建立了反映低渗透油层压裂开采过程物理本质的 3 区模型和考虑启动压力梯度的菱形反九点注水开发井网基质与裂缝耦合的两相渗流数学模型。

(2) 研究表明, 裂缝越长, 累积产量越高, 但裂缝越长, 含水率增加越快; 开采初期小井距、小排距的开发井网型式的累积产量大于大井距、大排距, 其含水率上升速度要快于大井距、大排距的开发井网型式; 随着开采时间的推移, 大井距、大排距的累积产量逐渐超过小井距、小排距的井网型式。裂缝的导流能力越低, 其累积产量越小, 含水率也越小。随着导流能力的增加, 累积产量的增加幅度变小。注水井排与裂缝的夹角对产量的影响不大。因此, 应针对不同情况合理优选井距。

(3) 通过对菱形反九点压裂井网产量影响因素的分析, 进一步揭示了整体压裂基质-裂缝耦合两相流动开采变化规律。

参 考 文 献

[1] 李宜强, 班凡生, 高树生等. 有效应力对裂缝型低渗透砂岩油藏压力响应的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(6):

1649—1652.

LI Yi-qiang, BAN Fan-sheng, GAO Shu-sheng. Effect of effective stress on fractured low-permeability sand-stone reservoir pressure response[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1649—1652.

[2] 连志龙, 张劲, 吴恒安. 水力压裂扩展的流固耦合数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3021—3026.

LIAN Zhi-long, ZHANG Jing, WU Heng-an. A simulation study of hydraulic fracturing propagation with a solid-fluid coupling model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3021—3026.

[3] CRAWFORD P B. Sweep efficiencies of vertically fracture five-spot patterns[J]. **Petroleum Engineer**, 1956, 28(3): 95—102.

[4] PRATS M. Effect of vertical fracture on reservoir behavior-incompressible fluid case[C]//35th Annual Fall Meeting of SPE. Denver: [s. n.], 1960: 58—60.

[5] GRINGARTEN A C. Computer-Aided well test analysis[C]//International Meeting on Petroleum Engineering. Beijing: [s. n.], 1986: 20—24.

[6] 刘慈群. 垂直裂缝地层中流体的渗流[J]. 石油勘探与开发, 1987, 8(3): 69—72.

LIU Ci-qun. The flow of fluid through porous media with a vertical fracture[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 1987, 8(3): 69—72.

[7] 宋付权, 刘慈群, 吴柏志. 各向异性油藏椭圆不定常渗流近似解[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 57—59.

SONG Fu-quan, LIU Ci-qun, WU Bo-zhi. The elliptic transient flow of vertically fractured well in anisotropic reservoir[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2001, 28(1): 57—59.

[8] 刘金林, 张在田, 邹皓. 坪北特低渗透油田压裂工艺技术的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2003, 26(3): 42—45.

LIN Jin-lin, ZHANG Zai-tian, ZOU Hao. The research and application of fracturing technology in the Pinbei extra-low permeability oilfield[J]. **Drilling & Production Technology**, 2003, 26(3): 42—45.

[9] 甘云雁, 张士诚, 陈利, 等. 流线模型模拟垂直裂缝压裂井生产动态研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 115—120.

GAN Yun-yan, ZHANG Shi-cheng, CHEN Li, et al. Production performance simulation of vertical fracturing wells by using streamline model[J]. **Journal of Oil and Gas Technology**, 2007, 29(3): 115—120.

- [10] 杨思玉, 宋新民. 特低渗透油藏井网型式数值模拟研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 64—67.
YANG Si-yu, SONG Xin-min. Numerical simulation for the well pattern of low-permeability oil reservoirs[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2001, 28(6): 64—67.
- [11] 张士诚, 温庆志, 王凤和, 等. 水平缝四点井网整体压裂裂缝参数优化设计[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 74—78.
ZHANG Shi-cheng, WEN Qing-zhi, WANG Feng-he, et al. Optimization design of integral fracturing parameters for four-spot well pattern with horizontal fractures[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2004, 25(1): 74—78.
- [12] 李阳. 低渗透油藏矢量井网设计与整体压裂优化研究[J]. 石油大学学报, 2005, 29(6): 53—56.
LI Yang. Design of vector well pattern and optimization of integral fracturing in low permeability reservoir[J]. **Journal of China University of Petroleum**, 2005, 29(6): 53—56.
- [13] FREDERIC J. New correlations to predict non-Darcy flow coefficients at immobile and mobile water saturation[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 1994.