



低渗油藏垂直裂缝井产量递减规律

熊健¹, 但涛², 陈庆³, 周程²

1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500
2. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司蜀南气矿, 四川泸州 646001
3. 中国石油长庆油田分公司第二采油厂, 甘肃庆阳 745100

摘要 油气藏改造时受地层复杂地应力的影响, 压裂形成的垂直裂缝通常关于井筒不对称或裂缝左右两翼不在同一平面。针对垂直裂缝的特征, 基于不稳定流理论, 应用势理论、势叠加原理和数值分析方法, 推导出低渗油藏垂直裂缝井产量动态预测模型, 并利用实例分析了油井产量动态递减规律。结果表明, 低渗油藏垂直裂缝井产量递减规律表现为油井初期产量较高, 油井产量递减速度较快, 而中后期油井产量进入缓慢递减阶段; 裂缝非对称率对油井产量变化的影响较小, 在开发初期, 不共面夹角对油井产量变化的影响较大, 油藏非均质性强弱对油井产量变化影响显著; 裂缝长度越长, 裂缝导流能力越大, 油井产量越高, 产量递减速度越快; 随着裂缝长度和导流能力增加, 产量增幅逐渐变小。

关键词 低渗油藏; 垂直裂缝; 裂缝非对称率; 不共面夹角; 非均质性; 不稳定流; 递减规律

中图分类号 TE312

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.34.009

Production Decline Laws for Vertical Fracture Well in Low-permeability Oil Reservoirs

XIONG Jian¹, DAN Tao², CHEN Qing³, ZHOU Cheng²

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. Shu'nan Gas Field, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Luzhou 646001, Sichuan Province, China
3. No. 2 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang 745100, Gansu Province, China

Abstract The vertical fracture is asymmetrical about the wellbore or the two wings of the fracture are not certainly in a line for the complex geo-stress in the possession of fracturing of oil gas reservoirs. In view of the low-permeability reservoir after fracturing developing the asymmetrical vertical fractures and non-coplanar fractures, based on the non-steady seepage theory, and using the potential function theory, superimposition principle and numerical analysis method, a dynamical prediction model for the vertical fracture in low-permeability oil reservoirs is deduced with the pressure drop superposition principle. The production decline laws are analyzed with practical cases. The result shows that the production of the vertical fracture well is initially high but soon followed by a sharp decline. Then, the production keeps in a relatively stable state and declines slowly in the middle and later. The fracture asymmetry factor has a little effect on the oil well productivity. The non-coplanar angles have a greater effect on the oil well productivity in the initial stage. The reservoir heterogeneity has a significant effect on the oil well productivity. The longer the fracture length and the bigger the flow conductivity, the higher the oil well production and the faster the decline rate will be. However, the increase amplitude will be getting smaller and smaller with the increasing fracture length and flow conductivity.

Keywords low-permeability oil reservoirs; vertical fracture; fracture asymmetry factor; non-coplanar angle; heterogeneity; non-steady seepage; decline laws

0 引言

目前, 低渗透油藏常采用水力压裂技术提高油井产量,

水力压裂形成的裂缝可沟通低渗透油气储层, 进而改变地层的渗流条件^[1], 降低储层中流体的渗流阻力, 提高流体的流动

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-09-22

基金项目: 西南石油大学研究生创新基金项目 (GIFSS0701)

作者简介: 熊健, 博士研究生, 研究方向为油气田开发理论及油气藏工程, 电子信箱: 361184163@qq.com

能力,使得压裂前后的产量预测模型不同。针对低渗油藏垂直压裂井的产能评价,许多学者提出多种计算模型。例如,蒋廷学^[2]、张伟东^[3]等采用保角变换法建立了垂直压裂井产能模型;李生等^[4]利用椭圆流法建立了垂直裂缝井的产能模型;尹洪军等^[5]利用双线性流法建立垂直裂缝井模型;黄勇等^[6]利用位势理论推导了垂直裂缝井产能模型;熊健等^[7-10]分别利用保角变换、椭圆流及双线性流法推导了垂直裂缝气井产能模型;杨勇^[11]、张晓亮等^[12]研究了启动压力梯度、压力敏感性对低渗透油藏压裂井产量动态递减规律的影响。垂直裂缝井的渗流数学模型都以垂直裂缝关于井筒对称为前提,而在实际情况中,因为地层复杂的地应力场影响,形成的裂缝往往关于井筒不对称或裂缝左右两翼不在同一平面。相对于对称垂直裂缝油井产量评价研究,不对称垂直裂缝井研究^[13-16]较少。因此,本文基于不稳定渗流理论,应用势理论、势叠加原理和数值分析方法,在考虑垂直裂缝关于井筒不对称且裂缝左右两翼不在同一平面的情况下,推导低渗油藏油井压裂后有限导流垂直裂缝井产量的动态预测模型,研究和分析油井产量动态递减规律及各因素对油井产量的影响。

1 垂直裂缝井产量预测模型

渗流力学模型如图 1 所示。假设:①油藏的上下为封闭边界,四周为无限大,在油藏的中心有一口直井;②压裂裂缝为垂直裂缝,裂缝高度等于整个油层厚度,沿井眼呈不对称分布且裂缝左右两翼不在同一平面;③在油藏和裂缝中均为单相流动,裂缝为有限导流能力,油藏和裂缝中流动均不考虑非线性流渗流特征的影响。模型中的直井经压裂形成的垂直裂缝筒称为垂直裂缝井。

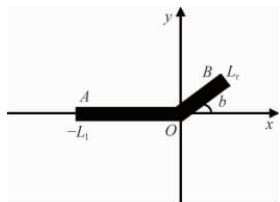


图 1 垂直裂缝井(直井)渗流力学模型

Fig. 1 Physical seepage model of vertical fracturing well

图 1 中,经压裂形成的垂直裂缝沿井筒呈不对称分布,设井筒两边的左右翼缝长分别为 L_l 和 L_r ($L_l > L_r$),定义左右翼裂缝长之比 $\alpha = L_r / L_l$ ($0 < \alpha \leq 1$) 为非对称率,以垂直裂缝的左翼方向为 x 轴,以垂直于裂缝的左翼方向为 y 轴建立坐标系,设裂缝右翼裂缝面与左翼裂缝面成夹角为 β ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$),其中线段 AB 表示裂缝(AO 为裂缝左翼, OB 为裂缝右翼),点 O 表示井筒。

地层中任意一点压降计算以无限大均匀地层点汇的压降公式为基础^[7],含有垂直裂缝地层中任意一点的压降模型可以将裂缝看成是由无数个“点汇”构成,利用势叠加原理(将左、右两翼上所有“点汇”对地层中任意一点 (x, y) 产生压降相加,可得出整条裂缝对地层中任意一点 (x, y) 产生压降)进行

求解。裂缝上每一个“点汇”的坐标不但与裂缝左、右翼缝长有关,还与左、右翼缝所在平面的夹角 β 有关,将裂缝左、右两翼分别分成 n 等份,每 1 等份作为一个“点汇”进行研究^[8]。以每个小段的中点坐标表示该段的坐标,则裂缝左、右翼上第 j 个“点汇”坐标 (x_{lj}, y_{lj}) 、 (x_{rj}, y_{rj}) 可表示为

$$(x_{lj}, y_{lj}) = \left[-\frac{2n-2j+1}{2n}L_l, 0 \right]$$

$$(x_{rj}, y_{rj}) = \left[\frac{2j-1}{2n}L_r \cos\beta, \frac{2j-1}{2n}L_r \sin\beta \right]$$

根据势叠加原理,地层中任意一点 (x, y) 产生的压降为

$$p_i - p(x, y, t) = \sum_{j=1}^n \frac{q_{lj} \mu_o B_o}{4\pi K h} [-E_i(-\psi_{l1})] + \sum_{j=1}^n \frac{q_{rj} \mu_o B_o}{4\pi K h} [-E_i(-\psi_{2j})] \quad (1)$$

其中

$$\psi_{1j} = \frac{\left(x + \frac{2n-2j+1}{2n}L_l \right)^2 + y^2}{4\varphi t} \quad (2)$$

$$\psi_{2j} = \frac{\left(x - \frac{2j-1}{2n}L_r \cos\beta \right)^2 + \left(y - \frac{2j-1}{2n}L_r \sin\beta \right)^2}{4\varphi t}$$

式中, p_i 为原始地层压力, MPa; $p(x, y, t)$ 为任意一点 (x, y) 在 t 时刻受到的压力, MPa; q_{lj} 为裂缝左翼第 j 小段产量, m^3/d ; q_{rj} 为裂缝右翼第 j 小段产量, m^3/d ; $E_i(-x)$ 为积分函数; μ_o 为原油黏度, $MPa \cdot s$; B_o 为体积系数; φ 为地层导压系数, $\mu m^2 \cdot MPa / (Pa \cdot s)$; K 为地层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h 为油藏厚度, m ; t 为渗流时间, d 。

设裂缝左翼尖端压力为 p_{li} , 右翼尖端压力为 p_{ri} , 则由势叠加原理可得到 t 时刻左、右翼裂缝尖端产生的压降为

$$p_i - p_{li} = \sum_{j=1}^n \frac{q_{lj} \mu_o B_o}{4\pi K h} [-E_i(-\psi_{3j})] + \sum_{j=1}^n \frac{q_{rj} \mu_o B_o}{4\pi K h} [-E_i(-\psi_{4j})] \quad (3)$$

$$p_i - p_{ri} = \sum_{j=1}^n \frac{q_{lj} \mu_o B_o}{4\pi K h} [-E_i(-\psi_{5j})] + \sum_{j=1}^n \frac{q_{rj} \mu_o B_o}{4\pi K h} [-E_i(-\psi_{6j})] \quad (4)$$

其中

$$\psi_{3j} = \frac{\left(\frac{2n-2j+1}{2n}L_l - \frac{2n-1}{2n}L_l \right)^2}{4\varphi t} \quad (5)$$

$$\psi_{4j} = \frac{\left(\frac{2j-1}{2n}L_r \cos\beta - \frac{2n-1}{2n}L_l \right)^2 + \left(\frac{2j-1}{2n}L_r \sin\beta - \frac{2n-1}{2n}L_l \right)^2}{4\varphi t} \quad (6)$$

$$\psi_{5j} = \frac{\left(\frac{2n-2j+1}{2n}L_l + \frac{2n-1}{2n}L_r \cos\beta \right)^2 + \left(\frac{2n-1}{2n}L_r \sin\beta \right)^2}{4\varphi t} \quad (7)$$

$$\psi_{6j} = \frac{\left(\frac{2j-1}{2n}L_r \cos\beta - \frac{2n-1}{2n}L_r \cos\beta \right)^2}{4\varphi t} + \frac{\left(\frac{2j-1}{2n}L_r \sin\beta - \frac{2n-1}{2n}L_r \sin\beta \right)^2}{4\varphi t} \quad (8)$$



裂缝左、右两翼不在同一平面,裂缝两翼平面成一定夹角,可将裂缝的左、右翼看成是流动半径分别为 $\sqrt{\frac{2L_l h}{\pi}}$ 、 $\sqrt{\frac{2L_r h}{\pi}}$,裂缝宽度为 W_f ,边界压力为裂缝尖端压力 p_{fl} 、 p_{fr} ,井底压力为 p_{wf} 的径向流^[18,19],由裂缝向井筒的渗流过程推导为

$$p_{fl} + p_{fr} - 2p_{wf} = \frac{(q_l + q_r)\mu_o B_o}{2\pi K_f W_f} \left[\ln\left(\sqrt{\frac{2L_l h}{\pi}} / r_w\right) + \ln\left(\sqrt{\frac{2L_r h}{\pi}} / r_w\right) \right] \quad (9)$$

式中, q_l 为裂缝左翼产量, m^3/d ; q_r 为裂缝右翼产量, m^3/d ; r_w 为井半径, m ; K_f 为裂缝渗透率, $10^{-3}\mu m^2$ 。

综合式(3)、(4)和(9),可推导出

$$p_i - p_{wf} = \frac{(q_l + q_r)\mu_o B_o}{4\pi K_f W_f} \left[\ln\left(\sqrt{\frac{2L_l h}{\pi}} / r_w\right) + \ln\left(\sqrt{\frac{2L_r h}{\pi}} / r_w\right) \right] + \sum_{j=1}^n \frac{\mu_o B_o}{8\pi K_i h} \{q_{yl}[-E_i(-\psi_{j3}) - E_i(-\psi_{j5})] + q_{yr}[-E_i(-\psi_{j4}) - E_i(-\psi_{j6})]\} \quad (10)$$

左翼上每个点汇的产量为

$$q_{yl} = \frac{L_l}{n(L_l + L_r)} Q_o \quad (11)$$

右翼上每个点汇的产量为

$$q_{yr} = \frac{L_r}{n(L_l + L_r)} Q_o \quad (12)$$

综合式(10)~(12),引入非均质性系数 $\eta = \sqrt{K_x/K_y}$ ^[20],并化简有

$$p_i - p_{wf} = \frac{Q_o \mu_o B_o}{1.086 K_f W_f} \left[\ln\left(\sqrt{\frac{2L_l h}{\pi}} / r_w\right) + \ln\left(\sqrt{\frac{2L_r h}{\pi}} / r_w\right) \right] + \sum_{j=1}^n \frac{0.461 Q_o \mu_o B_o}{n(L_l + L_r) \eta K_f h} \{L_l [-E_i(-\eta \psi_{j3}) - E_i(-\eta \psi_{j5})] + L_r [-E_i(-\eta \psi_{j4}) - E_i(-\eta \psi_{j6})]\} \quad (13)$$

其中, Q_o 为工程单位下的油井压裂后产量, m^3/d ; K_x 为地层水平方向的渗透率, $10^{-3}\mu m^2$; K_y 为地层垂向的渗透率, $10^{-3}\mu m^2$ 。

式(13)为低渗油藏在考虑垂直裂缝关于井筒不对称且裂缝左右两翼不在同一平面情况下,有限导流垂直裂缝井产量动态预测模型,幂积分函数采用数值分析方法求解。

2 应用分析

吐哈油田某低渗油藏基本参数包括:油层的含油层段为西山窑组,油层中部平均地层压力为24.1MPa,深度为2259~2445m,渗透率为 $0.35 \times 10^{-3} \sim 10.02 \times 10^{-3} \mu m^2$,孔隙度为12.5%~16.8%,原油黏度为1.24~8.28mPa·s,原油体积系数为1.116~1.237,油藏有效厚度为7.84~9.31m,裂缝长度为80~135m,裂缝渗透率为 $8 \sim 80 \mu m^2$,生产压差为7MPa。利用本文推导油井产量预测模型,以该油藏为例,分别研究裂缝非对称率、不共面夹角、非均质性、裂缝长度和裂缝导流能力对油井产量变化规律的影响。

图2为裂缝非对称率 α 对油井产量递减规律的影响。从图2可看出,在开发初期油井产量递减速度较快,中后期油

井产量变化趋于变缓; α 变化时,油井产量变化幅度较小,说明 α 对油井产量递减规律影响较小。

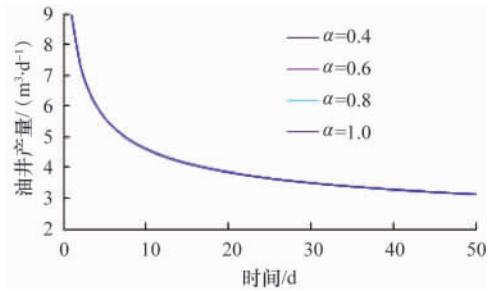


图2 裂缝非对称率 α 对油井产量递减规律的影响
Fig. 2 Influences of fracture asymmetry factors on the decline law of oil well productivity

图3为不共面夹角 β 对油井产量递减规律的影响。从图3可看出,在开发初期油井产量递减速度较快,中后期油井产量变化趋于变缓; β 越大,油井初始产量越小,油井产量递减速度越慢,随着 β 增大,油井产量下降幅度逐渐增大。

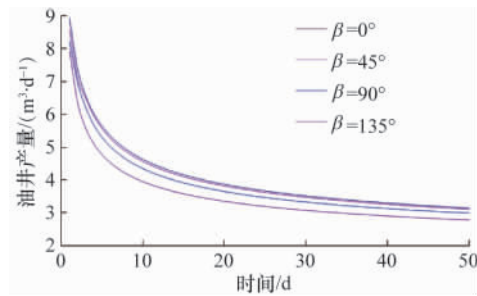


图3 不共面夹角 β 对油井产量递减规律的影响
Fig. 3 Influences of non-coplanar angles on the decline law of oil well productivity

图4为非均质性对油井产量递减规律的影响。从图4可见,在开发初期油井产量递减速度较快,中后期油井产量变化趋于变缓;非均质性越强即非均质性系数 η 越小,油井初始产量越小,油井产量递减速度越慢,随着非均质性减弱即 η 增大,油井产量增加幅度逐渐减小。

图5为裂缝长度 L 对油井产量递减规律的影响。从图5可看出,在开发初期油井产量递减速度较快,中后期油井产量变化趋于变缓;裂缝长度越长,油井初始产量越大,油井产量递减速度越快,随着裂缝长度增加,油井产量增加幅度逐渐减小,可能是由于考虑了裂缝导流能力,裂缝中存在压降,即裂缝长度越长,裂缝内渗流阻力越大。

图6为裂缝导流能力 F_{CD} 对油井产量递减规律的影响。从图6可看出,在开发初期油井产量递减速度较快,中后期油井产量变化趋于变缓;裂缝导流能力越大,油井初始产量越大,油井产量递减速度越快,随着压裂缝导流能力的增加,油井产量增加幅度逐渐减小,可能原因是裂缝导流能力较小时,在裂缝附近及裂缝中流体的渗流阻力增大,使油井产量降低;裂缝导流能力较大时,在裂缝附近及裂缝中流体渗流阻力减小,使油井产量增加,而油藏供给跟不上,出现“抽空”现象,导致油井产量增幅减小。

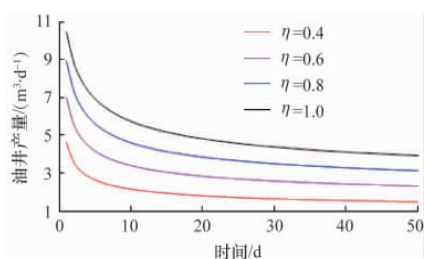


图 4 非均质性对油井产量递减规律的影响
Fig. 4 Influences of heterogeneity degrees on the decline law of oil well productivity

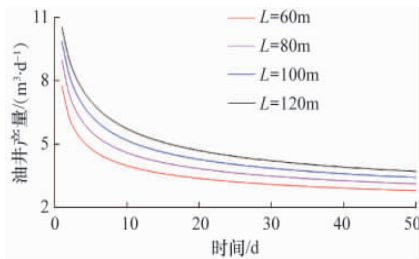


图 5 裂缝长度对油井产量递减规律的影响
Fig. 5 Influences of crack lengths on the decline law of oil well productivity

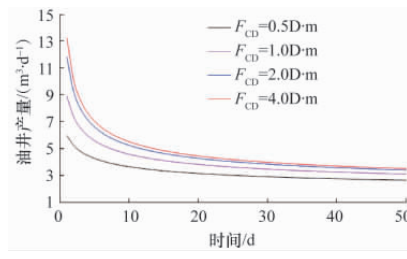


图 6 裂缝导流能力对油井产量递减规律的影响
Fig. 6 Influence of fracture conductivity capacities on the decline law of oil well productivity

3 结论

(1) 在垂直裂缝关于井筒不对称且裂缝左右两翼不在同一平面的情况下,基于不稳定流理论,应用势理论、势叠加原理和数值分析方法,推导出低渗油藏垂直裂缝井产量的预测模型,并分析了油井产量动态递减规律。

(2) 低渗油藏垂直裂缝井的产量递减规律表现为油井初期产量较高,油井产量递减速度较快,而中后期油井产量进入缓慢递减阶段。

(3) 裂缝非对称率对油井产量变化影响较小,在开发初期不共面夹角对油井产量变化影响较大,油藏非均质性强弱对油井产量变化影响显著。

(4) 裂缝长度越长,裂缝导流能力越大,油井产量越高,产量递减速度越快,而随着裂缝长度和导流能力增加,产量增加幅度逐渐变小。

参考文献 (References)

[1] 蒋廷学, 王宝峰, 单文文, 等. 整体压裂优化方案设计的理论模式[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 58-62.
Jiang Tingxue, Wang Baofeng, Shan Wenwen, et al. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 58-62.

[2] 蒋廷学, 单文文, 杨艳丽. 垂直裂缝井稳态产能的计算[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 61-63.
Jiang Tingxue, Shan Wenwen, Yang Yanli, et al. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 61-63.

[3] 张伟东, 杨铁军, 蒋廷学, 等. 保角变换法用于计算压裂井产能[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(S1): 81-82.
Zhang Weidong, Yang Tiejun, Jiang Tingxue, et al. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(S1): 81-82.

[4] 李生, 李霞, 曾志林, 等. 低渗透油藏垂直裂缝井产能评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 54-55.
Li Sheng, Li Xia, Zeng Zhilin, et al. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(1): 54-55.

[5] 尹洪军, 刘宇, 付春权. 低渗透油藏压裂井产能分析[J]. 特种油气藏, 2005, 12(2): 55-56.
Yin Hongjun, Liu Yu, Fu Chunquan. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(2): 55-56.

[6] 黄勇, 李春兰, 程林松, 等. 低渗透油藏垂直裂缝井产能评价新方法[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(1): 99-101.
Huang Yong, Li Chunlan, Cheng Linsong, et al. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(1): 99-101.

[7] 熊健, 赵文萃, 樊松. 非线性流下低渗气藏酸压井产能方程[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(6): 49-53.
Xiong Jian, Zhao Wenping, Fan Song. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(6): 49-53.

[8] 熊健, 于路均, 郭平. 非线性渗流低渗气藏压裂井的产能方程[J]. 天然气与石油, 2012, 30(6): 42-45.
Xiong Jian, Yu Lujun, Guo Ping. Natural Gas and Oil, 2012, 30(6): 42-45.

[9] 熊健, 王婷, 郭平, 等. 考虑非达西效应的低渗气藏压裂井产能分析[J]. 天然气与石油, 2012, 30(1): 64-66.
Xiong Jian, Wang Ting, Guo Ping, et al. Natural Gas and Oil, 2012, 30(1): 64-66.

[10] 熊健, 邱桃, 郭平, 等. 非线性渗流下低渗气藏压裂井产能评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 92-96.
Xiong Jian, Qiu Tao, Guo Ping, et al. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 92-96.

[11] 杨勇. 低渗透压敏油藏产量递减动态预测方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 64-67.
Yang Yong. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(3): 64-67.

[12] 张晓亮, 李婷, 孙君书, 等. 低渗透油藏压裂井产能分析[J]. 科技导报, 2011, 29(19): 58-61.
Zhang Xiaoliang, Li Di, Sun Junshu, et al. Science & Technology Review, 2011, 29(19): 58-61.

[13] Rodríguez F U, Cinco L H, Samaniego V F. Evaluation of fracture asymmetry of finite-conductivity fractured wells[J]. Society of Petroleum Engineers, 1992, 7(2): 233-239.

[14] 曹宝军, 李相方, 姜子杰, 等. 压裂火山岩气井不对称裂缝产能模型研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(8): 79-81.
Cao Baojun, Li Xiangfang, Jiang Zijie, et al. Natural Gas Industry, 2009, 29(8): 79-81.

[15] Djebbar T, Jing Lu, Hung N, et al. Evaluation of fracture asymmetry of finite-conductivity fractured wells [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2010, 132(1): 1-7.

[16] 刘银山, 李治平, 赖枫鹏, 等. 不共面裂缝气藏水平井产能预测模型[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 96-101.
Liu Yinshan, Li Zhiping, Lai Fengpeng, et al. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 96-101.

[17] 徐严波, 齐桃, 杨凤波, 等. 压裂后水平井产能预测新模型[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 89-91.
Xu Yanbo, Qi Tao, Yang Fengbo, et al. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 89-91.

[18] 张学文, 方宏长, 裴泽楠, 等. 低渗透率油藏压裂水平井产能影响因素[J]. 石油学报, 1994, 20(4): 59-63.
Zhang Xuewen, Fang Hongchang, Qiu Yinan, et al. Acta Petrolei Sinica, 1994, 20(4): 59-63.

[19] 曾凡辉, 郭建春, 徐严波, 等. 压裂水平井产能影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 474-477.
Zeng Fanhui, Guo Jianchun, Xu Yanbo, et al. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 474-477.

[20] 李思源, 罗万静, 韩培慧, 等. 储层渗透率各向异性对垂直裂缝井产能的影响[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(3): 86-89.
Li Siyuan, Luo Wanqing, Han Peihui, et al. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(3): 86-89.

(责任编辑 侯澄芝, 马宇虹)