

低渗透油藏仿水平井注采井网产能

李荣强^{1,2}, 吕爱民¹, 王建忠¹, 李阳¹, 詹世远¹, 王月英¹

[1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580;

2. 中国石化胜利油田分公司工程技术管理中心, 山东 东营 257000]

摘要:仿水平井技术可大幅度增加单井泄油面积和控制储量,实现了低丰度、特低渗透油藏的有效动用。为比较该技术与传统水平井技术开发效果的不同,对仿水平井不同开发井网稳态产能进行精确快速预测,以仿水平井渗流特征为基础,基于流管流线积分方法建立了不同井网形式考虑启动压力梯度的仿水平井产能预测模型。与实际产量对比表明,所建立产能预测模型得到的计算结果具有较高的准确度(最大误差为8.04%)。通过应用所建立模型进行计算对比可知,仿水平井长度相同时,交错井网稳态产能大于正对井网稳态产能,波及面积较大,开发效果较好,而且正对井网对水井长度的敏感性大于交错井网。该研究对特低渗透油藏仿水平井井网注水开发具有一定的理论指导意义。

关键词:产能;穿透比;仿水平井;注采井网;低渗透油藏

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Productivity of the imitation horizontal well pattern in low permeability reservoirs

Li Rongqiang^{1,2}, Lyu Aimin¹, Wang Jianzhong¹, Li Yang¹, Zhan Shiyuan¹, Wang Yueying¹

(1. China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Engineering Technology Management Center of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: Imitation horizontal wells can significantly enlarge single well drainage area and increase controlled reserves, thus effectively develop low-abundance and ultra-low permeability reservoirs. In order to accurately and rapidly predict steady-state productivity of various imitation horizontal well patterns, deliverability prediction models with start-up pressure being taken into consideration were established for different imitation horizontal well patterns by using stream tube flow line integral method based on seepage flow characteristics of imitation horizontal wells. Comparison of the modeling results with actual production shows that the models are accurate in productivity prediction with an error less than 8.04% only. The models also show that staggered well pattern is better than cross well pattern in terms of steady-state productivity and sweep area when the lengths of the imitation horizontal well are the same. The latter is also more sensitive to well length than the former. The study may help theoretically guiding the application of imitation horizontal wells in ultra-low permeability reservoirs.

Key words: productivity, penetration ratio, imitation horizontal well, injector-producer pattern, low-permeability oil reservoir

针对特低渗透油藏常规开发产能低、效益差的问题,胜利油田2012年以来应用仿水平井技术结合合适井网进行注水开发,突破了特低渗透油藏难以有效开发的瓶颈。与直井常规压裂、弹性开发不同,仿水平井技术可形成类似水平井筒的长缝渗流通道。裂缝半长一般达到200 m以上,为普通直井压裂的2~3倍,平均单井控制储量为普通直井压裂的1.6倍,并可大幅

度提高油井产能。目前特低渗透油藏仿水平井开发在渗流机理、井网部署及产能预测等方面的研究尚相对滞后^[1-4],制约了该技术在低渗透油藏中的进一步规模化实施。王锋、Stalgorov和Rbeawi等学者多利用保角变换、点源函数、拉式变换等方法对井网稳态产能和非稳态产能进行计算,普遍存在应用局限、公式复杂等问题^[5-13],难以推广到低渗透油藏仿水平井注采井网。

收稿日期:2016-01-21;修订日期:2016-04-25。

第一作者简介:李荣强(1973—),男,博士研究生,高级工程师,油气田开发理论与技术。E-mail: lironqiang.slyt@sinopec.com。

通讯作者简介:王建忠(1973—),博士、副教授,油气渗流理论与油田开发技术。E-mail: wangjzh@upc.edu.cn。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(14CX05025A, 14CX02045A);国家自然科学基金项目(51490654)。

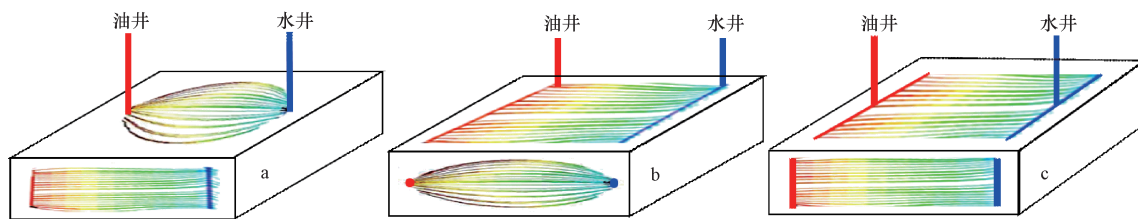


图1 仿水平井与直井、水平井流线分布对比示意图

Fig. 1 Streamline distributions of imitation horizontal, vertical and horizontal wells

a. 直井渗流场; b. 水平井渗流场; c. 仿水平井渗流场

为了保证预测精度并提高计算速度,亟需针对低渗油藏仿水平井井网的渗流特点^[14-17]开展相关的研究,从而为现场仿水平井井网的优化部署奠定理论基础。

1 仿水平井井网产能模型的建立

仿水平井技术是通过高加砂量,在储层中形成半缝长达200m以上的长缝,形成“仿水平井”,增大泄油面积,提高油井产能。图1为仿水平井与直井、水平井的流线分布对比示意图。由图可见,仿水平井继承了水平井的平面渗流特征,其注采井网在平面和纵向上均呈现线性流模式,渗流阻力比常规的直井和水平井都小,更易克服启动压力梯度,在低渗油藏中取得高产能。

1.1 单井产量的推导

根据上述仿水平井井网流线特征,采用劈分流场法,建立仿水平井井网产能模型,基本假设包括:①流体为油水两相流体;②仿水平井高度与油层有效厚度相等,忽略仿水平井形态变化;③不考虑多孔介质和液体的压缩性;④等温稳态渗流;⑤考虑启动压力梯度的影响。

从注入井到生产井,可视为油藏流体在以不同流线为边界形成的“流管”内流动。流管具有如下性质:①流管不能相交;②流管形状及位置,在定常流动时不随时间变化;③流管不能在流场内部中断。假设油水井之间由一系列流管构成,任一不与流管侧面平行的面被流管截取的那部分面积,称作流管截面。考虑启动压力梯度时截面处流量:

$$\Delta q = \frac{K}{\mu} A(\xi) \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \lambda \right) \quad (1)$$

式中: Δq 为截面流量, cm^3/s ; k 为地层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; $A(\xi)$ 为截面面积, cm^2 ; λ 为启动压力梯度, $0.1 \text{ MPa}/\text{cm}$; μ 为地层混合流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

稳定渗流的混合流体粘度按照多相流饱和度加权法修正,即:

$$\mu = \mu_o \left(1 - \frac{S_{iw} - S_{iwc}}{1 - S_{ior} - S_{iwc}} \right) + \mu_w \left(\frac{S_{iw} - S_{iwc}}{1 - S_{ior} - S_{iwc}} \right) \quad (2)$$

式中: μ_o 为油相粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ_w 为水相粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; S_{iw} 为瞬时含水饱和度, %; S_{iwc} 为束缚水饱和度, %; S_{ior} 为残余油饱和度, %。

如图2所示,在一个注采单元内,井距 $AB = L, \text{cm}$; 流管 ξ , 流管面积 $A(\xi), \text{cm}^2$; 流管中心流长 X, cm , 由 X_1 和 X_2 组成; r_w 为注水井和生产井的井筒半径, cm 。

对(1)变形并沿流线积分:

$$\Delta q \int_X \frac{d\xi}{A(\xi)} = \int_X \frac{K}{\mu} (dp - \lambda d\xi) \quad (3)$$

可得沿流线积分的流量为:

$$\Delta q = \frac{\frac{K}{\mu} [p_i - p_w - \lambda \left(\int_{r_w}^{X_1} d\xi + \int_{r_w}^{X_2} d\xi \right)]}{\int_{r_w}^{X_1} \frac{d\xi_1}{A(\xi_1)} + \int_{r_w}^{X_2} \frac{d\xi_2}{A(\xi_2)}} \quad (4)$$

式中: h 为油层有效厚度, cm ; p_i 为注水井井底压力, 0.1 MPa ; p_w 为采油井井底压力, 0.1 MPa 。

将 $\Delta\alpha$ 取无穷小量,流管面积可近似为: $A(\xi) = h\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2}$; 流线长度 $X_1 = \frac{L \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$, $X_2 = \frac{L \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$; α_m 为特定井网条件下可提供的最大角度, $(^\circ)$, 角度关系 $\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha_m}{\beta_m} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta}$ 。

代入式(4)可得 X 流线上产量:

$$\Delta q = \frac{\frac{k}{\mu} [p_i - p_w - \frac{\lambda L (\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - 2\lambda r_w]}{\frac{1}{h \tan \frac{\Delta\alpha}{2}} \ln \frac{L \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{1}{h \tan \left(\frac{\beta_m \Delta\alpha}{\alpha_m} \right)} \ln \frac{L \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)}} \quad (5)$$

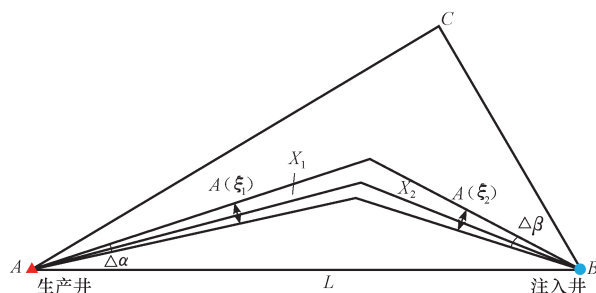


图2 注采单元示意图

Fig. 2 Sketch map of the flooding unit

对 $\frac{\Delta q}{\Delta \alpha}$ 在 $\Delta \alpha \rightarrow 0$ 时求极限并进行积分,注意到 $p_i - p_w \gg 2\lambda r_w$, 近似可得:

$$q = \int_0^{\alpha_0} \frac{\frac{Kh}{\mu} \left[p_i - p_w - \frac{\lambda L (\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]}{2 \left[\ln \frac{L \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{L \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)} \right]} d\alpha \quad (6)$$

由于启动压力梯度的存在,在低渗透油藏注采压差一定时,并非整个井网单元都能动用,将渗流达到稳态时能动用的最大注水井和生产井的张开角度定为 α_n , 即(6)式中被积分函数等于0时的 α 取值, α_0 为可以波及到的最大角度,则 $\alpha_0 = \min \{ \alpha_m, \alpha_n \}$ 。

1.2 交错排状仿水平井网产能

取注采井网的1/4为计算单元(图3),将其分为3个区,划分基本原则是保持计算单元与实际流线尽量一致,以保证计算结果的合理性。

其中I区、II区产能近似为曲线流管积分,可利用单井注采公式得到产量。

1) I区产量

$$q_1 = \int_0^{\alpha_{01}} \frac{\frac{kh}{\mu} \left[p_i - p_w - \frac{\lambda d_1 (\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]}{2 \left[\ln \frac{d_1 \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d_1 \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)} \right]} d\alpha \quad (7)$$

2) II区产量

$$q_2 = \int_0^{\alpha_{02}} \frac{\frac{kh}{\mu} \left[p_i - p_w - \frac{\lambda d_2 (\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]}{2 \left[\ln \frac{d_2 \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d_2 \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)} \right]} d\alpha \quad (8)$$

其中, α_{01}, α_{02} 为产生有效流量的流线所能张开的最大角度:

$$\alpha_{01} = \min \{ \beta_1, \alpha_{n1} \} \quad (9)$$

$$\alpha_{02} = \min \{ \beta_2, \alpha_{n2} \} \quad (10)$$

3) III区产量

假设仿水平油井长度 L_1 与仿水平水井长度 L_2 存在以下关系:

$$L_2 = mL_1 (m \neq 1) \quad (11)$$

利用三角变化关系,可以得到:

$$d_z = \sqrt{d_1^2 + (1-m)^2 L^2 - 2d_1(1-m)L \sin \alpha_L} \quad (12)$$

由插值可得微流管截面积为(图4):

$$A(\xi) = \frac{\xi}{d_L} \Delta L + \left(1 - \frac{\xi}{d_L} \right) m \Delta L \quad (13)$$

根据(4)式可得微流管产量:

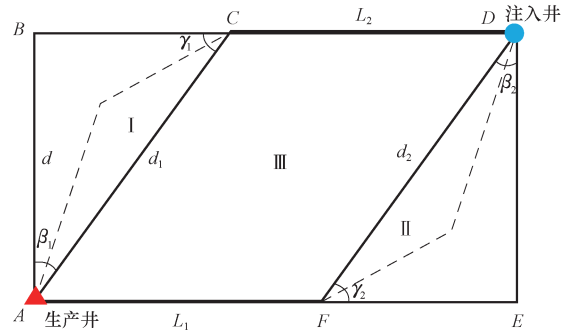


图3 交错排状井网1/4注采单元

Fig. 3 Sketch map of 1/4 flooding unit of the cross well pattern

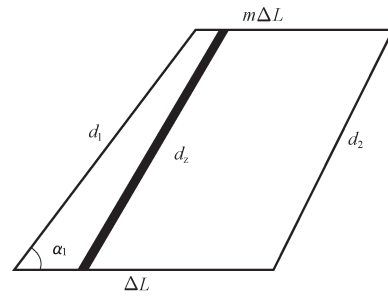


图4 交错排状井网III区计算单元

Fig. 4 Sketch map of III zone of the cross well pattern

$$\begin{aligned} \Delta q &= \frac{\frac{K}{\mu} (p_i - p_w - \lambda dL)}{\int_0^{d_z} \frac{1}{\left[\frac{\xi}{d_L} \Delta L + \left(1 - \frac{\xi}{d_L} \right) m \Delta L \right] h} d\xi} \\ &= \frac{\frac{Kh}{\mu} (p_i - p_w - \lambda dL)}{\frac{d_z}{(1-m)\Delta L} \ln \frac{1}{m}} \end{aligned} \quad (14)$$

对 $\frac{\Delta q}{\Delta L}$ 在 $\Delta L \rightarrow 0$ 时取极限,求积分可得III区产量:

$$q_3 = \begin{cases} \int_0^{L_1} \frac{\frac{Kh}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d_z)}{\frac{\ln m}{m-1} d_z} dl, & m > 1 \\ \int_0^{L_1} \frac{\frac{Kh}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d_z)}{\frac{\ln \frac{1}{m}}{1-m} d_z} dl, & m < 1 \\ \frac{Kh}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d_z) \times L_1, & m = 1 \end{cases} \quad (15)$$

1.3 正对式仿水平井网产能

与交错井网第III区类似,可以得到正对排状井网

I区微流管产量(图5),对 $\frac{\Delta q}{\Delta L}$ 在 $\Delta L \rightarrow 0$ 时取极限,求

积分可得:

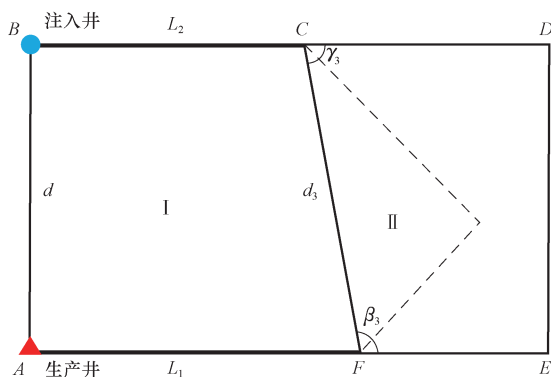


图5 正对排状井网 1/4 注采单元

Fig. 5 Sketch map of 1/4 flooding unit of the staggered well pattern

$$q_1 = \begin{cases} \int_0^{L_1} \frac{Kh}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d_z) \frac{\ln m}{m-1} dL, & m > 1 \\ \int_0^{L_1} \frac{Kh}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d_z) \frac{\ln \frac{1}{m}}{1-m} dL, & m < 1 \\ \frac{Kh}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d_z) \times L_1, & m = 1 \end{cases} \quad (16)$$

与交错井网 II 区、III 区相似,可以得到正对井网 II 区流量为:

$$q_2 = \int_0^{\alpha_{03}} \frac{\frac{Kh}{\mu} [p_i - p_w - \frac{\lambda d_3 (\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}]}{2 \left[\ln \frac{d_3 \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d_3 \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)} \right]} d\alpha \quad (17)$$

式中: $\alpha_{03} = \min \{ \beta_3, \alpha_{n3} \}$ 。

2 产能模型的验证与对比

2.1 产能模型验证

根据沙河街组三段(沙三段)低渗透油藏的相关资料,设定储层基质渗透率 $K = 5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层有效厚度 $h = 10\text{m}$, 注入井井底压力 $p_i = 52 \text{ MPa}$, 油井井底压力为 $p_w = 22 \text{ MPa}$, 启动压力梯度 $\lambda = 0.06 \text{ MPa/m}$, 井距 $L = 600 \text{ m}$, 排距 $d = 200 \text{ m}$, 水井压缝半长 $L_2 = 200 \text{ m}$, 油井压缝半长 $L_1 = 200 \text{ m}$, 地层原油的体积系数 $B_o = 1.1$, 地面原油的密度 $\rho_o = 0.90 \text{ g/cm}^3$, 油相的粘度 $\mu_o = 2.31 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 水相的粘度 $\mu_w = 0.31 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 稳态后的含水饱和度 $S_w = 0.80$, 束缚水饱和度 $S_{wc} = 0.25$, 残余油饱和度 $S_{or} = 0.17$, 此时水相相对渗透率 $K_{rw} = 0.46$, 油相相对渗透率为 $K_{ro} = 0.37$ 。

对试验区块不同井网形式下共 11 口仿水平井稳态产能进行统计整理(表 1), 根据实际参数, 利用产能模型计算结果与之进行对比验证, 最大误差为 8.04%, 能够满足现场的精度要求。

2.2 两种井网的产能对比

由图 6 知, 在相同的仿水平井长度下, 随井底流压增大, 两种井网产油量基本呈现线性下降的趋势; 在相同井底流压下, 随仿水平井长度的增加, 产油量逐渐增大。仿水平井长度相同时, 交错井网稳态产能大于正对井网稳态产能, 而且水井长度对正对井网影响程度大于其对交错井网的影响。

3 结论

1) 仿水平井井网稳态渗流在平面和纵向上均呈现线性流模式, 继承了水平井的平面渗流特征, 改善了水平井纵向渗流模式。

2) 根据正对式、交错式仿水平井注采井网的不同区域油水两相流线特征差异, 分别计算叠加的不同油藏区域的产能, 可快速计算不同仿水平井注采井网的产能, 并具有较高的精度。

3) 仿水平井长度相同时, 交错井网稳态产能大于正对井网稳态产能, 而且水井长度对正对井网影响程度大于其对交错井网的影响。

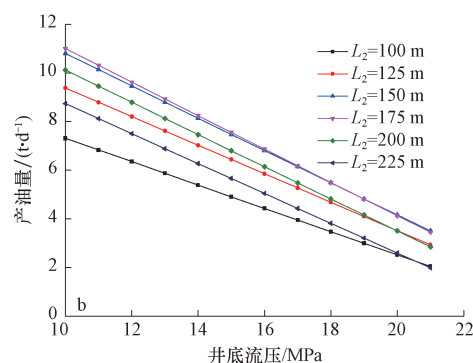
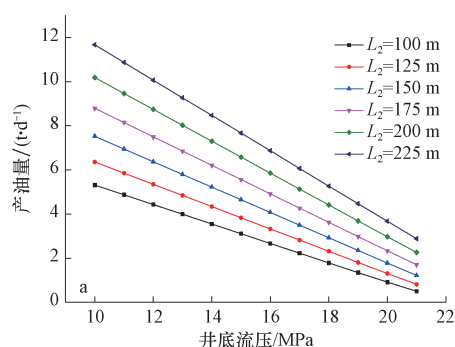


图6 两种井网仿水平井产油量对比曲线

Fig. 6 Correlative production curves of two well patterns

表1 产能新模型与实际产能验证数据

Tab.1 Comparison of model prediction and actual data

井名	井网形式	采油井裂缝半长/ m	注水井裂缝半长/ m	排距/m	注采压差/ MPa	实际稳态产能/ ($t \cdot d^{-1}$)	模型计算产能/ ($t \cdot d^{-1}$)	误差/%
井1	交错	205	150	300	21	10.9	11.6	6.42
井2	交错	160	150	300	20	9.5	10.2	7.37
井3	交错	225	200	300	20	12.8	13.8	7.81
井4	交错	150	200	300	21	11.2	12.1	8.04
井5	交错	200	200	280	20	13.4	12.8	4.48
井6	正对	150	200	380	22	14.5	15.4	6.21
井7	正对	115	100	400	23	13.2	13.6	3.03
井8	正对	200	180	380	22	15.2	16.0	5.26
井9	交错	160	150	240	19	9.7	9.2	5.15
井10	交错	200	140	300	18	8.7	8.9	2.30
井11	正对	120	140	300	18	9.8	10.3	5.10

参 考 文 献

- [1] 廉黎明,秦积舜,杨思玉,等.水平井渗流模型分析评价及发展方向[J].石油与天然气地质,2013,34(6):821-826.
Lian Liming, Qin Jishun, Yang Siyu, et al. Analysis and evaluation on horizontal well seepage models and their developing trends[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 821-826.
- [2] 计秉玉,李莉,王春艳.低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J].石油学报,2008,2(29):256-261.
Ji Bingyu, Li Li, Wang Chunyan. Oil production calculation for area well pattern of low-permeability reservoir with non-Darcy seepage flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 2(29): 256-261.
- [3] 苏玉亮,曹国梁,袁彬,等.低渗透油藏压裂井网水电模拟[J].深圳大学学报(理工版),2013,30(3):294-298.
Su Yuliang, Cao Guoliang, Yuan Bin, et al. Hydroelectric simulation experimental research on fractured well pattern in low permeability reservoirs[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2013, 30(3): 294-298.
- [4] 杨清立,杨正明,王一飞,等.特低渗透油藏渗流理论研究[J].钻采工艺,2007,30(6):52-55.
Yang Qingli, Yang Zhengming, Wang Yifei, et al. Study of flow theory in ultra-low permeability oil reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(6): 52-55.
- [5] 王锋,刘慧卿,吕广忠.低渗透油藏长缝压裂直井稳态产能预测模型[J].油气地质与采收率,2014,21(1):81-83.
Wang Feng, Liu Huiqing, Lv Guangzhong. Steady-state productivity prediction model for long-length fractured vertical well in low permeability oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 81-83.
- [6] Wang J, Jia A. A general productivity model for optimization of multiple fractures with heterogeneous properties[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 608-624.
- [7] Stalgorova E, Mattar L. Practical analytical model to simulate production of horizontal wells with branch fractures[C]//SPE Canadian Unconventional Resources Conference, Calgary, Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [8] Torcuk M A, Kurtoglu B, Fakcharoenphol P, et al. Theory and application of pressure and rate transient analysis in unconventional reservoirs[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [9] Stalgorova K, Mattar L. Analytical model for unconventional multifractured composite systems[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2013, 16(03): 246-256.
- [10] Jiang R, Xu J, Sun Z, et al. Rate transient analysis for multistage fractured horizontal well in tight oil reservoirs considering stimulated reservoir volume[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014.
- [11] Al Rbeawi S J H, Tiab D. Effect of penetrating ratio on pressure behavior of horizontal wells with multiple-inclined hydraulic fractures[C]//SPE Western Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [12] Al Rbeawi S, Tiab D. Impacts of reservoir boundaries and fracture dimensions on pressure behaviors and flow regimes of hydraulically fractured formations[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2014, 4(1): 37-57.
- [13] Al-kobaisi M, Ozkan E, Kazemi H. A hybrid numerical/analytical model of a finite-conductivity vertical fracture in intercepted by a horizontal well[J]. SPE, 2006: 345-355.
- [14] 李军诗,侯剑锋,胡永乐,等.压裂水平井不稳定渗流分析[J].石油勘探与开发,2008,35(1):92-96.
Li Junshi, Hou Jianfeng, Hu Yongle, et al. Performance analysis of unsteady porous flow in fractured horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1): 92-96.
- [15] 廉培庆,同登科,程林松,等.垂直压裂水平井非稳态条件下的产能分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(4):98-102.
Lian Peiqing, Tong Dengke, Cheng Linsong, et al. Analysis of productivity in unsteady state of vertical fractured horizontal well[J]. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33(4): 98-102.
- [16] 郭肖,伍勇.启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透气藏水平井产能的影响[J].石油与天然气地质,2007,28(4):539-543.
Guo Xiao, Wu Yong. Influence of start-up pressure gradient and stress sensitivity on productivity of low-permeability gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 539-543.
- [17] 熊敏.利用启动压力梯度计算低渗透油藏极限注采井距的新模型及应用[J].石油天然气学报,2006,28(6):146-149.
Xiong Min. A new model for calculating ultimate injection-production well spacing in low permeability reservoirs with starting pressure gradient and its application[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(6): 146-149.