

川渝地区带状气藏分支水平井的产能公式 ——齐成伟公式的推广

陈鹏焯¹, 陈俊², 邹先锋³, 侯骏⁴, 梁海军⁵, 李娜⁶

1. 西部钻探克拉玛依录井工程公司四分公司, 新疆库尔勒 841000
2. 西部钻探克拉玛依录井工程公司一分公司, 新疆克拉玛依 834000
3. 西部钻探克拉玛依录井工程公司三分公司, 新疆阜康 831511
4. 长城钻探工程有限公司测试公司伊朗作业区, 德黑兰圣瓦尼亚瑟 999067
5. 川庆钻探钻采工程技术研究院院长庆分院, 西安 710018
6. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院采收率技术研究所, 西安 710075

摘要 齐成伟公式是国内外首次出现的建立于带状油藏的水平井产能预测公式, 但不适用于气藏。为了预测川渝地区带状气藏中分支水平井的产能, 根据气相渗流与液相渗流的相似原理和 Roberts 气体相对渗透率与含硫饱和度关系, 成功地将齐成伟公式改造为带状高含硫气藏中分支水平井的拟三维产能预测公式。根据齐成伟公式的高含硫气藏修正公式, 分析硫沉积量和渗透率各向异性系数对产能的影响规律后, 取得了硫沉积量对产能的影响大于渗透率各向异性系数、在带状高含硫气藏中宜打纵向双分支水平井的重要认识。建议将齐成伟的圆形油藏中辐射状分支水平井拟三维产能公式推广到圆形高含硫气藏中。

关键词 带状气藏; 硫沉积; 齐成伟; 分支水平井; 产能公式; 川渝气田

中图分类号 TE312

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.08.005

Productivity Formulae of Branched Horizontal Well in Ribbon-Shaped Gas Reservoir in Sichuan-Chongqing Region: Promoting of Qi Chengwei's Formulae

CHEN Pengye¹, CHEN Jun², ZOU Xianfeng³, HOU Jun⁴, LIANG Haijun⁵, LI Na⁶

1. Fourth Branch, XDEC Karamay Logging Engineering Company, Korla 841000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China
2. First Branch, XDEC Karamay Logging Engineering Company, Karamay 834000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China
3. Third Branch, XDEC Karamay Logging Engineering Company, Fukang 831511, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China
4. Iran Operation Area, GWDC Well Testing Company, Tehran Valiasr 999067, Iran
5. Changqing Branch, CCDC Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, Xi'an 710018, China
6. Research Institute, Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd, Xi'an 710075, China

Abstract Qi Chengwei's formulae consists of the two formulae for predicting horizontal well productivity, proposing at first time in the world; the formulae is only for the prediction of ribbon-shaped petroleum reservoir, but not for the prediction of natural gas reservoir. In order to predict the productivity of branched horizontal well in ribbon-shaped gas reservoir in the Sichuan-Chongqing region, according to the similarity principle between gas seepage and liquid seepage and the relationship between gas relative permeability and sulfur saturation summed up by Roberts, the famous Qi Chengwei's formulae are successfully generalized to pseudo three-dimensional productivity formulae of horizontal well in ribbon-shaped sour gas reservoir. On the basis of the revised formulae, the impact of sulfur deposition amount and permeability anisotropy coefficient on productivity is analyzed, and important knowledge that the effect of sulfur deposition amount on productivity is greater than that of permeability anisotropy coefficient is obtained and longitudinal bilateral horizontal well possesses more advantages than transverse horizontal well in ribbon-shaped sulphuric gas reservoir. At last, a proposal

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2012-12-21

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05009); 陕国土资矿发(2011)80号项目(yesy2012ky-g-03); 陕西省重大科学技术难题攻关项目(2011KTZB-04-03)

作者简介: 陈鹏焯, 工程师, 研究方向为地质录井、油气田开发, 电子信箱: girder_navy@yeah.net

that the pseudo three-dimensional productivity formula derived by Qi Chengwei for radial branched horizontal well in circular petroleum reservoir should be promoted to sulphuric gas reservoir is put forward.

Keywords ribbon-shaped gas reservoir; sulfur saturation; Qi Chengwei; branched horizontal well; productivity formula; Sichuan-Chongqing Gas Field

0 引言

齐成伟等应用共形映射理论导出了带状油藏中纵向双分支水平井和横向水平井的拟三维产能公式^[1-5]。张烈辉等^[6]分析钻、完井过程中产生的表皮系数后,通过等值渗流阻力法成功地将齐成伟的带状油藏中纵向双分支水平井拟三维产能公式推广为带状低渗透油气藏中纵向双分支水平井在裸眼完井、割缝衬管完井和砾石充填完井方式下的产能公式。游支云等^[7]根据齐成伟的带状油藏中纵向水平井拟三维产能公式与横向水平井拟三维产能公式的差异,分析了带状油藏中水平井方位对产能和采收率的影响。与齐成伟根据直线井群复势公式导出的带状油藏中横向完全穿透水平井的精确产能公式进行对比分析后,陈德民等^[8]证实了齐成伟的带状油藏中横向水平井拟三维产能公式在生产段完全穿透带状油藏时具有相当高的预测精度。陈元千等^[9]利用陈小凡等的方法,成功地将齐成伟的带状油藏中横向水平井拟三维产能公式推广到低渗气藏中。

齐成伟公式是国内外首次出现的建立于带状油藏的水平井产能预测公式,而以往的产能预测公式^[10-12],如苏联著名的 Борисов 公式、美国著名的 Joshi 公式,均默认油藏边界为圆形。梁峰等^[13]证实蒋廷学公式和程林松公式以及邹丹等^[14]证实 Борисов 公式和 Joshi 公式,分别为齐成伟导出的圆形油藏中辐射状分支水平井拟三维产能公式在各分支生产段相接、分支生产段只有一条时的退化公式。

以上是用于水平井产能预测的最新公式,均由齐成伟导出^[15-21]。然而,由于川渝气田的典型特征是高含硫,齐成伟公式不适用于川渝气田,因而需要将其适用条件推广为高含硫气藏,即建立齐成伟公式的高含硫气藏修正公式。

1 齐成伟公式

带状油藏,成因于古河道沉积或者两平行断层的夹蔽,广泛存在于地质储层中。

1.1 带状油藏中纵向水平井的拟三维产能公式

带状油藏中纵向双分支水平井的拟三维产能公式由齐成伟导出^[3],为

$$Q_{lb} = \frac{2\pi K_h(p_e - p_w)}{\mu B} \left[\frac{\beta}{2(s_o - s_i)} \ln \frac{\beta H \csc(\pi h/H)}{\pi(1+\beta)r_w} + \frac{1}{H} \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(\pi a/b) - \operatorname{ch}(2\pi s_i/b)}{\operatorname{ch}(2\pi s_o/b) - \operatorname{ch}(2\pi s_i/b)}} \right] \quad (1)$$

其中, Q_{lb} 为带状油藏中纵向双分支水平井的产能, m^3/s ; s_i 为环形裂缝群^[8,12,13]的内接圆半径, m ; s_o 为环形裂缝群的外接圆

半径, m ; 渗透率各向异性系数 $\beta = \sqrt{K_h/K_v}$, 无因次; K_h 为储层水平方向主渗透率, m^2 ; K_v 为储层铅垂方向主渗透率, m^2 ; h 为生产段井筒离储层底部的高度, m ; H 为储层厚度, m ; a 为带状油藏中两供液面的距离, m ; b 为带状油藏宽度, m ; r_w 为井筒半径, m ; p_e 为供液边界压强, Pa ; p_w 为井底压强, Pa ; μ 为流体运动黏度, $Pa \cdot s$; B 为体积系数。

带状油藏中纵向双分支水平井的两条生产段长度均为 $s_o - s_i$, 且位置居中, 即到临近供液边界的距离均为 $(a - 2s_o)/2$, 到两侧壁的距离均为 $b/2$, 详见图 1。公式(1)的适用条件是 $a \geq 3s_o$ 且 $a \geq 3b$ 。

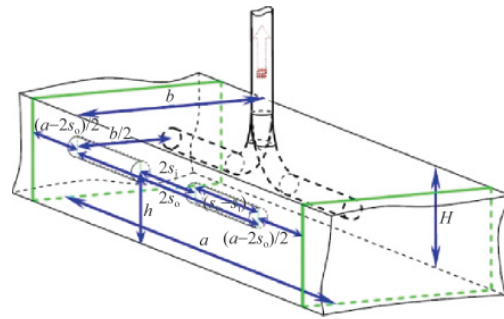


图 1 带状油藏中的纵向双分支水平井

Fig. 1 Longitudinal bilateral horizontal well in ribbon-shaped reservoir

做替换 $s_i \rightarrow 0, s_o \rightarrow L/2$, 得齐成伟带状油藏中纵向双分支水平井拟三维产能公式的单分支退化公式

$$Q_l^o = \frac{2\pi K_h(p_e - p_w) / (\mu B)}{\frac{\beta}{L} \ln \frac{\beta H \csc(\pi h/H)}{\pi(1+\beta)r_w} + \frac{1}{H} \operatorname{arch} \frac{\operatorname{sh}[\pi a/(2b)]}{\operatorname{sh}[\pi L/(2b)]}} \quad (2)$$

其中, Q_l^o 为带状油藏中纵向(单分支)水平井的产能, m^3/s ; L 为水平井生产段长度, m 。

1.2 带状油藏中横向水平井的拟三维产能公式

齐成伟导出^[3]的带状油藏中横向水平井拟三维产能公式

$$Q_t^o = \frac{2\pi K_h(p_e - p_w)}{\mu B} \left[\frac{\beta}{L} \ln \frac{\beta H \csc(\pi h/H)}{\pi(1+\beta)r_w} + \frac{1}{H} \operatorname{arth} \left(\sin \frac{\pi L}{2b} \sqrt{\cot^2 \frac{\pi L}{2b} + \operatorname{th}^2 \frac{\pi a}{2b}} \right) \right] \quad (3)$$

其中, Q_t^o 为带状油藏中横向水平井的产能, m^3/s 。

带状油藏中横向水平井的生产段居中, 即到两供液边界的距离均为 $a/2$, 到两侧壁的距离均为 $(b - L)/2$, 详见图 2。公式(3)的适用条件是 $a \geq 3b$ 。

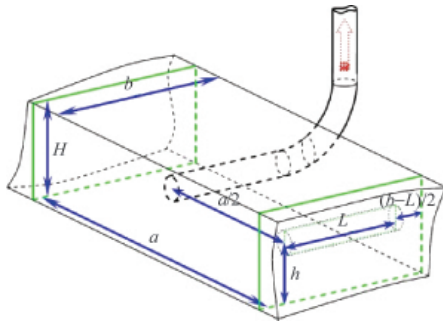


图2 带状油藏中的横向水平井

Fig. 2 Transverse horizontal well in ribbon-shaped reservoir

2 齐成伟公式的推广

气藏中分支水平井的产能预测已经得到深入研究,并形成了李彦超公式^[22]、陈元千公式^[9]、公培斌公式^[23]。

根据气相渗流与液相渗流的相似原理:以气相拟压强

$m(p) = \int 2p/(\mu Z) dp$ 替换油相压强 p , 气相 T_{ps}/T_{sc} 替换油相 $\mu B/2$;

根据 Roberts^[24] 气体相对渗透率 K_{rg} 与含硫饱和度 S_s 关系

$\ln K_{rg} = \alpha S_s$; 以硫沉积后气藏水平渗透率 $K_{h1} e^{\alpha S_s}$ 替换油藏水平渗透率 K_h 。经过以上两步替换,齐成伟公式便被改造为带状高含硫气藏中分支水平井的拟三维产能预测公式。

2.1 纵向双分支水平井

公式(1)经过以上两步替换后变为带状高含硫气藏中纵向双分支水平井的产能公式,即

$${}^s Q_{fb}^e = \frac{\pi T_{sc} K_{h1} e^{\alpha S_s} (p_e^2 - p_w^2)}{\bar{\mu} \bar{Z} T_{psc}} \left/ \left[\frac{\beta}{2(s_o - s_i)} \ln \frac{\beta H \text{csc}(\pi h/H)}{\pi(1+\beta)r_w} + \frac{1}{H} \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(\pi a/b) - \operatorname{ch}(2\pi s_i/b)}{\operatorname{ch}(2\pi s_o/b) - \operatorname{ch}(2\pi s_i/b)}} \right] \right. \quad (4)$$

其中, ${}^s Q_{fb}^e$ 为带状高含硫气藏中纵向双分支水平井的产能, m^3/s ; 标准状况下的温度 $T_{sc} = 273.15\text{K}$; $\alpha = -6.22$ 为常数; T 为气藏(天然气)温度, K ; p_{sc} 为标准大气压, 101325Pa ; $\bar{\mu}$ 为天然气平均运动黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; \bar{Z} 为天然气平均压缩因子, 无因次。特别地, 当含硫饱和度为 0 时, 式(4)退化为无硫或硫不沉积的低含硫带状气藏中纵向双分支水平井的拟三维产能预测公式。当带状高含硫气藏中纵向水平井的分支数为 1 时,

$\operatorname{arch} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(\pi a/b) - \operatorname{ch}(2\pi s_i/b)}{\operatorname{ch}(2\pi s_o/b) - \operatorname{ch}(2\pi s_i/b)}}$ 部分变为^[22] $\operatorname{arch} \frac{\operatorname{sh}[\pi a/(2b)]}{\operatorname{sh}[\pi L/(2b)]}$ 。

2.2 横向水平井

式(3)经过以上两步替换后变为带状高含硫气藏中横向水平井的产能公式, 即

$${}^s Q_{f1}^e = \frac{\pi T_{sc} K_{h1} e^{\alpha S_s} (p_e^2 - p_w^2)}{\bar{\mu} \bar{Z} T_{psc}} \left/ \left[\frac{\beta}{L} \ln \frac{\beta H \text{csc}(\pi h/H)}{\pi(1+\beta)r_w} + \frac{1}{H} \operatorname{arth} \left(\sin \frac{\pi L}{2b} \sqrt{\cot^2 \frac{\pi L}{2b} + \operatorname{th}^2 \frac{\pi a}{2b}} \right) \right] \right. \quad (5)$$

其中, ${}^s Q_{f1}^e$ 为带状高含硫气藏中横向水平井的产能, m^3/s 。特别地, 当含硫饱和度为 0 时, 式(5)退化为无硫或硫不沉积的低

含硫带状气藏中横向水平井的拟三维产能预测公式。

3 产能敏感性分析

观察式(4)、式(5)发现, $e^{\alpha S_s}$ 称为储层渗透率的硫沉积伤害系数。然而, 渗透率还受 β 的影响, 因而有必要研究 S_s 和 β 对产能的综合影响规律。

不妨取几何参数 $a=300\text{m}$, $b=100\text{m}$, $h=12\text{m}$, $H=20\text{m}$, $r_w=0.1\text{m}$; 取物理参数 $K_{h1}=1 \times 10^{-14}\text{m}^2$, $\bar{\mu}=3.2 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\bar{Z}=0.96$, $T=393.15\text{K}$, $p_e=5.6 \times 10^7\text{Pa}$, $p_w=2.8 \times 10^7\text{Pa}$ 。以 β 为纵坐标, S_s 为横坐标, 绘出 ${}^s Q_{fb}^e$ 、 ${}^s Q_{f1}^e$ 、 ${}^s Q_{f2}^e$ 曲面图, 如图 3 所示。图中, 黄色曲面为 $s_i=20\text{m}$, $s_o=100\text{m}$ 时, ${}^s Q_{fb}^e$ 与 (S_s, β) 关系; 红色曲面为 $L=80\text{m}$ 时, ${}^s Q_{f1}^e$ 与 (S_s, β) 关系; 蓝色曲面为 $L=80\text{m}$ 时, ${}^s Q_{f2}^e$ 与 (S_s, β) 关系。

分析图 3 知: 相同井境下, 产能随着 β 或 S_s 的增大而减小, 且 β 对产能的影响明显小于 S_s 。

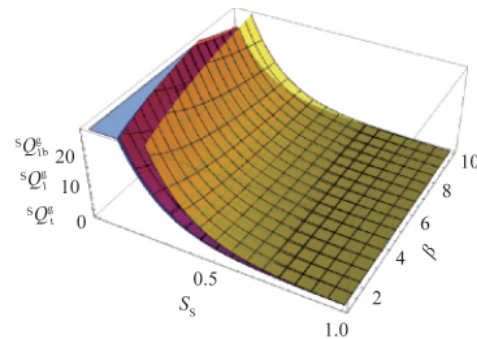


图3 产能随渗透率各向异性系数和含硫饱和度的变化规律

Fig. 3 Productivity changing with sulfur saturation and permeability anisotropy coefficient

为了看清楚相同井境和(生产段)井长下 ${}^s Q_{f1}^e$ 与 ${}^s Q_{f2}^e$ 的相对大小, 绘出 $({}^s Q_{f1}^e - {}^s Q_{f2}^e) - (S_s, \beta)$ 关系曲面, 如图 4 所示。

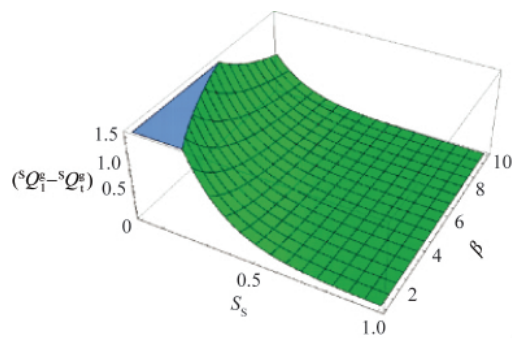


图4 产能差值随渗透率各向异性系数和含硫饱和度的变化规律

Fig. 4 Productivity difference changing with sulfur saturation and permeability anisotropy coefficient

分析图 4 知: 相同井境和(生产段)井长下, ${}^s Q_{f1}^e > {}^s Q_{f2}^e$ 且差值随着 β 或 S_s 的增大而减小。图 4 显示, 纵向双分支水平井会因为拥有更长的泄气通道而获得更高的产能。

支云等^[24]根据齐成伟公式从产能和采收率两方面对带状油藏中水平井方向进行了优选研究。研究表明: 在带状油

藏中,纵向水平井的产能远大于横向水平井,纵向水平井的采收率远小于横向水平井。采收率方面的结论由分析“死油区”的相对大小而得出。然而,气藏不同于油藏,不存在因压力梯度太小而形成的类似于死油区的“死气区”。所以,在带状高含硫气藏中,宜打纵向双分支水平井。

4 结论和建议

本文导出了带状高含硫气藏中分支水平井的拟三维产能预测公式,即齐成伟公式的高含硫气藏修正公式;带状高含硫气藏中,产能随渗透率各向异性系数的增大或含硫饱和度的增大而减小;相同井境下,渗透率各向异性系数对产能的影响明显小于含硫饱和度;相同井境和(生产段)井长下,纵向井产能大于横向井,且两者差值随渗透率各向异性系数或含硫饱和度的增大而减小;带状高含硫气藏中,宜打纵向双分支水平井。鉴于以上,建议将齐成伟的圆形油藏中辐射状分支水平井拟三维产能公式推广到圆形高含硫气藏中。

参考文献 (References)

- [1] Qi C W, Wang L L, Li B. Several questions about multi-lateral horizontal well productivity formulae[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(71/78): 4953-4957.
- [2] 齐成伟. 裂缝激发的渗流场之运动学分析[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(6): 35-36.
Qi Chengwei. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(6): 35-36.
- [3] 齐成伟. 带形地层中裂缝激发的渗流场之复分析[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(22): 38-39.
Qi Chengwei. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(22): 38-39.
- [4] 齐成伟, 龙芝辉, 汪志明. 水平井流入剖面的简捷计算方法[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 90-94.
Qi Chengwei, Long Zhihui, Wang Zhiming. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 90-94.
- [5] 黄世军, 杜殿发, 刘继林, 等. 拉格朗日描述在水平井渗流场中的应用探索——油气渗流力学教材增添内容之建议[J]. 内蒙古石油化工, 2012, 38(9): 1-3.
Huang Shijun, Du Dianfa, Liu Jilin, et al. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012, 38(9): 1-3.
- [6] 张烈辉, 熊友明, 陈军, 等. 带状低渗透油气藏中纵向双分支水平井在不同完井方式下的产能公式[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(25): 6454-6457.
Zhang Liehui, Xiong Youming, Chen Jun, et al. Science Technology and Engineering, 2012, 12(25): 6454-6457.
- [7] 游支云, 苏堪华, 王小秋, 等. 带形地层中水平井方位对产能和采收率的影响[J]. 特种油气藏, 2012, 19(4): 77-80.
You Zhiyun, Su Kanhua, Wang Xiaoqiu, et al. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(4): 77-80.
- [8] 陈德民, 崔一平, 高立超, 等. 分支水平井产能公式的精度分析 [J]. 油气地面工程, 2011, 30(3): 15-17.
Chen Demin, Cui Yiping, Gao Lichao, et al. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2011, 30(3): 15-17.
- [9] 陈元千, 范子菲, 冯文光, 等. 带状低渗气藏中横向水平井的产能公式 [C]//谢文彦, 张方礼. 第五届全国特种油气藏技术研讨会优秀论文集. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2012: 528-531.
Chen Yuanqian, Fan Zifei, Feng Wenguang, et al. Production formula for transverse horizontal well in ribbon-shaped gas reservoir with low permeability [C]//Xie Wenyan, Zhang Fangli. The Fifth National Special Reservoir Quality Papers Technical Seminar. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2012: 528-531.
- [10] 齐成伟. 环形井群激发的渗流场之复分析[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(2): 32-35.
Qi Chengwei. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(2): 32-35.
- [11] 齐成伟. 水平井渗流场的进一步探讨 [J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(24): 192-195.
Qi Chengwei. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, 35(24): 192-195.
- [12] 齐成伟. 环形裂缝群激发的渗流场之复分析 [J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(21): 39-40.
Qi Chengwei. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, 35(21): 39-40.
- [13] 梁峰, 孟维龙, 刘晓辉. 分支水平井产能方程式研究进展 [J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(5): 64-68.
Liang Feng, Meng Weilong, Liu Xiaohui. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(5): 64-68.
- [14] 邹丹, 马强, 王帅, 等. 水平井与分支水平井产能公式的一致性分析 [J]. 油气地球物理, 2011, 9(2): 59-61.
Zoudan, Ma Qiang, Wang Shuai, et al. Petroleum Geophysics, 2011, 9(2): 59-61.
- [15] 孟维龙, 王立垒, 田洪波, 等. 分支水平井产能预测研究总览[J]. 渤海石油职业学院教育研究, 2011, 7(4): 18-21.
Meng Weilong, Wang Lilei, Tian Hongbo, et al. Education Research of Bohai Sea Oil Vocational College, 2011, 7(4): 18-21.
- [16] 祝志敏, 梁海军, 阳晓燕, 等. 分支水平井产能计算研究[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(3): 82-84.
Zhu Zhimin, Liang Haijun, Yang Xiaoyan, et al. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(3): 82-84.
- [17] 付建昌. 分支水平井拟三维产能公式新体系 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(13): 80-83.
Fu Jianchang. Science Technology and Engineering, 2012, 12(13): 80-83.
- [18] 李辉, 赵春森, 曲占庆, 等. 断块油气藏中水平井的产能预测研究[J]. 钻采工艺, 2012, 35(6): 50-53.
Li Hui, Zhao Chunsen, Qu Zhanqing, et al. Drilling & Production Technology, 2012, 35(6): 50-53.
- [19] 齐成伟, 杨茂椿, 龙芝辉. 流体流入和流出裂缝的流动动态 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34(12): 112-115.
Qi Chengwei, Yang Maochun, Long Zhihui. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(12): 112-115.
- [20] 齐成伟, 刘竟成, 李世贵, 等. 割缝衬管完井方式下的直井产能计算方法[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(12): 21-22.
Qi Chengwei, Liu Jingcheng, Li Shigui, et al. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010, 29(12): 21-22.
- [21] 游支云, 吕劲, 郭伯云, 等. 带形油气藏中水平井方向优选研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(5): 103-106.
You Zhiyun, Lu Jing, Guo Boyun, et al. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(5): 103-106.
- [22] 李彦超, 孟维龙, 信艳永, 等. 带状低渗气藏中纵向双分支水平井的产能预测公式[J]. 价值工程, 2011, 30(25): 55-56.
Li Yanchao, Meng Weilong, Xin Yanyong, et al. Value Engineering, 2011, 30(25): 55-56.
- [23] 公培斌, 顾文欢, 杨占伟, 等. 低渗气藏中分支水平井的产能预测公式[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2011, 13(3): 26-28.
Gong Peibin, Gu Wenhuan, Yang Zhanwei, et al. Chengde Petroleum College Journal, 2011, 13(3): 26-28.
- [24] Roberts B E. The effect of sulfur deposition on gas well inflow performance[J]. SPE Reservoir Engineering, 1997, 12(2): 118-123.

(责任编辑 刘志远)