

# 应用数值模拟方法分析水平井井网高含水原因

熊波<sup>1,2</sup>, 雷群<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院大学渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007

2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要** 水平井是有效开发低渗透油藏的主要技术之一, 研究水平井开发过程中的产水规律对于该项技术的成功应用具有重要指导作用。在分析常规数值模拟中处理裂缝存在缺陷的基础上, 建立新的考虑裂缝的水平井数值模拟方法, 研究裂缝与水平井筒不同夹角、裂缝条数、单翼缝长、导流能力等因素对水平井产量和含水率的影响。数值模拟研究结果表明, 裂缝参数中对采出程度影响最大的为裂缝条数, 其次为单翼缝长和导流能力。将该方法应用于水平井试验区, 利用建立的模型对水平井组的生产动态进行模拟分析, 认为水平井含水率高的主要原因是水平井部分人工裂缝与注水井人工裂缝沟通。由此提出将部分水井关井或者封堵现有人工裂缝后重新压裂新裂缝的调整方案。调整方案进行现场应用, 取得良好的增产效果。

**关键词** 水平井井网; 斜交裂缝; 网格划分; 数值模拟模型

中图分类号 TE324

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.31.007

## Analysis on High Water Cut Ratio Well in Horizontal Well Pattern with Numerical Simulation Method

XIONG Bo<sup>1,2</sup>, LEI Qun<sup>1,3</sup>

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, University of Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

**Abstract** Horizontal well is an important method for the effective development of the low permeability reservoir. The research of the water producing has important guiding significance to the successful application of this technology. Based on the analysis on the defects of handling the fractures by conventional numerical simulation method, a new method is established to handle fractures for the numerical simulation of horizontal well. The influence of angles between the wellbore and the fracture, fracture parameters including fracture number, single-wing length and conductivity on the production and water ratio was researched. The results of numerical simulation indicate that fracture number has the most significant influence on recovery which is followed by single-wing length and conductivity with respect to the fracture parameters. The present method was applied to the test area of horizontal well. The production performance of the horizontal well groups was simulated by means of the established method. It is showed that the main cause for the high water cut is the connecting of the partial hydraulic fractures between the horizontal well and the injection well. Thus the new readjustment plan which recommends shut in partial horizontal wells or producing new fractures after plugging the existing hydraulic fractures was presented. The plan was applied to the production field and favorable response was achieved.

**Keywords** horizontal well pattern; transverse fractures; gridding; numerical simulation model

### 0 引言

水平井是开发低渗透油田的有效手段之一, 可以明显改

善低渗透油藏的开发效果, 提高经济效益。水平井压裂后可更大范围地沟通未动用储量, 极大提高油藏的采出程度, 它

收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-07-02

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05013-006)

作者简介: 熊波, 博士研究生, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: xiongb69@petrochina.com.cn

已成为低、特低渗透油藏开发的一项新兴而有效的技术<sup>[1-7]</sup>。

在应用压裂水平井开发低渗透油藏过程中,油井产水、储层受效不均等问题是决定其能否有效应用的关键因素<sup>[8-12]</sup>。如果压裂裂缝沟通水层,则在水平井开发早期含水将急剧上升,严重影响油藏开发效果。张学文等<sup>[8]</sup>使用数值模拟方法系统研究了压裂水平井的生产动态特征,建立了压裂水平井累积产量增产倍数图版,同时还研究了人工裂缝方向、垂直渗透率与水平渗透率比值、裂缝条数、裂缝长度、裂缝导流能力等参数对开发效果的影响。孙良田等<sup>[9]</sup>研究了水平井压裂裂缝的形态、渗流规律、压后产能预测,探讨了裂缝条数、裂缝长度和导流能力的优化以及不同的裂缝布局对压后产量的影响。王家禄等<sup>[10]</sup>通过二维可视化物理模拟装置对水平井开采底水油藏过程中的流体渗流规律进行了研究。贺丰果等<sup>[11]</sup>、王涛等<sup>[12]</sup>研究了水平井开发过程中的产水规律。由于实验测试技术的限制,物理模拟研究中仅能进行单因素实验,无法真实反映压裂水平井的真实开发过程。而目前数值模拟研究中对于裂缝与水平井井筒不同夹角、压裂裂缝参数优化等方面研究较少。本文在前期研究基础上,系统研究裂缝与水平井井筒不同夹角条件下的油井产能和产水规律,并在水平井试验区进行应用。

### 1 模型建立与裂缝处理方法

水平井斜交裂缝的数值模拟模型建立需要考虑如下方面<sup>[5]</sup>:首先是模型的控制方程和求解方法,其次是模型参数的处理输入方法,最后为斜交裂缝的处理方法。

#### 1.1 模型控制方程

黑油模型仍然适用低渗透水平井斜交裂缝的数值模拟<sup>[6]</sup>,采用 Eclipse 油藏数值模拟软件黑油模块进行水力裂缝优化,模型控制方程如式(1)所示。求解方程仍采用 IMPES 方法。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho_1 \frac{KK_{r1}}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho_1 \frac{KK_{r1}}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho_1 \frac{KK_{r1}}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 \phi S_1) \quad (1)$$

式中,下标 1 为 O(油)或 W(水); $\rho$  为密度,  $g/cm^3$ ;  $K$  为渗透率,  $10^{-3}\mu m^2$ ;  $K_{r1}$  为地层内网格点上相对渗透率;  $\mu$  为黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $p$  为压力,  $MPa$ ;  $\phi$  为孔隙度;  $S$  为地层中含油、含水饱和度。

#### 1.2 模型参数的处理输入方法

模型参数的处理输入可以通过建模软件实现。也可采用

一些前处理软件建立模型之后导入到油藏数值模拟软件中,如采用 Surfer 软件对所需的参数进行插值化,然后对插值后的参数利用 Eclipse 软件建模,这样模型既能满足定性分析的要求,也能较为贴切地描述油藏的实际情况。

### 1.3 裂缝的处理方法

在油藏数值模拟软件中,对裂缝的处理主要是通过网格的尺寸和对网格的赋值来完成。对网格的赋值为地层中含油、含水饱和度易实现,网格的尺寸较为困难,尤其对裂缝要求较高或井网中裂缝较多的情况。由于实际裂缝的尺寸比油藏的小 5~6 个数量级,这种情况下裂缝的尺寸如果选择过小则会影响计算的收敛性;裂缝的数量较多的话也同样会影响到计算的收敛性。由于计算机处理器的限制,不得不对裂缝的尺寸进行相应的扩大或选择高级的处理方法,即“等效导流能力”处理方法<sup>[7]</sup>。目前,油藏数值模拟软件对直井裂缝的处理已较为完善,可处理宽度与实际相似的裂缝,且裂缝的方位可在  $0^\circ \sim 360^\circ$  变化,通过指定模块对裂缝双翼长度、裂缝宽度、裂缝方向角、裂缝高度、裂缝渗透率和裂缝孔隙度进行设置,模拟结果较为合理。但是对于水平井裂缝的处理仍有许多工作要做,目前商业软件如 Eclipse 提供的模块只能处理裂缝的方位与水平井筒成  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两种情况。因此,对于水平井斜交裂缝,只能采用局部网格加密方法处理,本论文采用直角网格加密方法,实现对网格的加密,如图 1 所示。

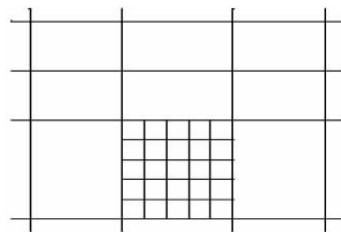


图 1 直角网格加密

Fig. 1 Grid refinement in Cartesian coordinate system

## 2 敏感因素分析

### 2.1 裂缝角度的影响

裂缝的角度对开发效果产生重要影响,特别是井排距比较小的情况。当地应力方向无法确定时,裂缝的角度也就无法确定,此时如果仅凭经验布井,则结果很有可能会导致开发失败。考虑如图 2 所示的 6 种方案情况,计算结果如图 3 所示。

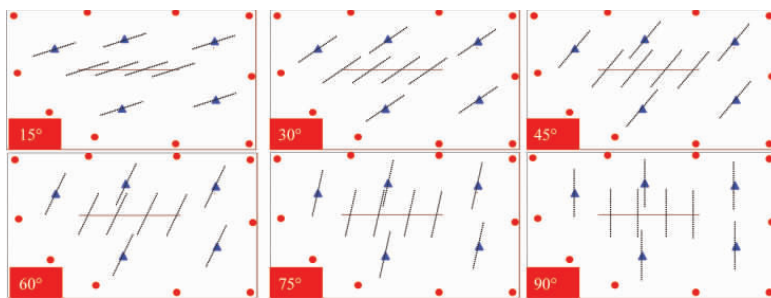


图 2 裂缝方向与井筒不同夹角的设计方案

Fig. 2 Different design programs with different angles between fracture orientation and wellbore

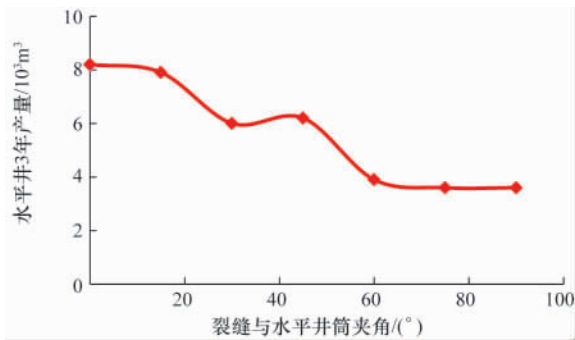
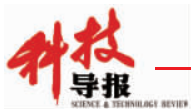


图3 裂缝与水平井筒的夹角对水平井产量的影响  
Fig. 3 Effect of angles between fracture orientation and wellbore on horizontal well production

从图3可以看出,当裂缝与水平井筒夹角为0°~15°时,注水井的水线驱替效果较好;30°~45°时,水平井与注水井的裂缝接近,缩短了见水时间;60°~90°时,水平井与注水井裂缝非常接近或相交,导致注水井的注入水沿生产井裂缝形成水窜,极大地降低了水平井的生产能力。

2.2 裂缝参数的影响

影响产油能力的裂缝参数主要包括裂缝条数、单翼缝长和导流能力3个因素。当3个因素共同作用时,必然存在一个最优组合,利用正交试验法寻找此组合。裂缝条数的4个取值水平分别为2条、3条、4条和5条,单翼缝长的4个取值水平分别为60、80、100和120m,导流能力的4个取值水平分别为10、20、30和40μm<sup>2</sup>·cm,共设计了16种方案,具体设计方案及计算结果如表1所示。

表1 正交试验设计方案及计算结果

Table 1 Design and computational results of orthogonal experimental programs

试验序号	单翼缝长/m	导流能力/(μm <sup>2</sup> ·cm)	裂缝条数	5年产量/m <sup>3</sup>
1	60	10	2	4613
2	80	20	3	7539
3	100	30	4	11702
4	120	40	5	13074
5	60	30	3	7580
6	80	40	2	5727
7	100	10	5	12257
8	120	20	4	11385
9	60	40	4	11291
10	80	30	5	12400
11	100	20	2	5518
12	120	10	3	6986
13	60	20	5	11806
14	80	10	4	9027
15	100	40	3	8369
16	120	30	2	6012

对正交试验方案计算结果的分析如表2所示。由表2可知,各因素不同取值水平下的5年累积产量相差较大,其中极差最大的因素为裂缝条数,其次是单翼缝长,极差最小的为导流能力,因此可以确定对采出程度影响的敏感性从高到低分别为裂缝条数、单翼缝长和导流能力。因素1即单翼缝长取值水平为2时(80m)累积产量最高,因素2即导流能力取值水平为3时(30μm<sup>2</sup>·cm)累积产量最高,因素3即裂缝条数取值水平为3时(4条)累积产量最高,因此可以确定最优的裂缝组合参数为裂缝条数4条、单翼缝长80m和裂缝导流能力30μm<sup>2</sup>·cm。

表2 正交试验设计方案计算结果分析

Table 2 Analyses on simulation results of orthogonal experimental design programs

取值水平	5年产量/m <sup>3</sup>		
	单翼缝长	导流能力	裂缝条数
水平1	8221	8822	5467
水平2	9615	8673	7618
水平3	9423	9461	12384
水平4	9062	9364	10851
极差R	1394	788	6917

3 试验区应用实例

3.1 区块概况

B6试验区采用300m×60m矩形井网直井与水平井联合开发,线性注水方式布井;根据初期资料最大主应力方向,确定井排方向为东西向。岩心孔隙度为8.1%~14.2%,平均为11%;空气渗透率平均为1.2×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>;地层原油密度0.812g/cm<sup>3</sup>,地层原油黏度6.4mPa·s,饱和压力5.13MPa,体积系数1.1,原始气油比18.7m<sup>3</sup>/t;地面原油密度0.8686t/m<sup>3</sup>,地面原油黏度46.3mPa·s,凝固点35.0℃;扶余油层地层水总矿化度平均为7221.5mg/L,水型为Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>型。根据初期采油方案,设计注水井单翼缝长为105~135m,导流能力为30μm<sup>2</sup>·cm;设计油井单翼缝长90~105m,导流能力为25μm<sup>2</sup>·cm。区块9口水平井共设计31个分段,设计加砂量463m<sup>3</sup>,实际分段压裂30段,加砂453m<sup>3</sup>。井下微地震和示踪剂监测结果显示压裂实现了有效分段。

压后8口水平井投产,初期日产量最高7.1t/d,最低0t/d,平均单井日产量4.7t/d,含水率最低16.5%(BF87-P51井组),最高100%(BF76-P51井组),平均49.8%。3个月后平均日产量降为2.5t/d,平均含水率上升至55.9%。可见B6区块产油效果不好的主要原因是产水率过高,根据水平井产水平均矿化度资料1890mg/L,初步分析产出水主要为注入水。

本文采用油藏数值模拟方法模拟区块含油饱和度的变化,分析产水率高的原因,从而提出有针对性的调整措施。选取BF76-P51井组说明,该井组初期水淹,初期含水就接近100%。

### 3.2 数值模拟模型的建立及验证

建模所用到的顶深底深值、净毛比、渗透率和孔隙度等数据,通过 Surfer 软件插值得到。插值方法如下:首先确定边界条件,取得边界内所有井的数据,分别对每个数据进行插值画出等值线,然后导出等值线上每个点的值。

建立模型后,需对建立的模型进行校验,以 BF76-P51 井组为例。分为储量拟合和产量拟合两个部分。首先进行储量拟合,地质储量大概为  $7.64 \times 10^4 \text{m}^3$ ,模拟计算得到的地质储量为  $7.79 \times 10^4 \text{m}^3$ ,误差为 2% 左右,因此认为在合理范围之内。其次是产量拟合,水平井组 BF76-P51 的日产水量和含水率的拟合如图 4 所示。

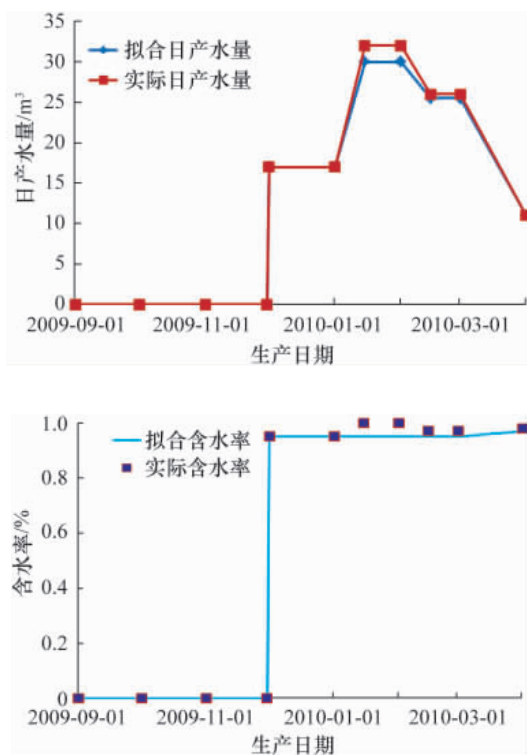


图 4 水平井组 BF76-P51 日产水量和含水率拟合图  
Fig. 4 History matching figures of water production and water cut of horizontal Well BF76-P51

由图 4 可知,拟合的误差都在合理的范围之内,模型建立是合理的。

### 3.3 模拟结果

图 5 是 BF76-P51 井组投产初期和生产 1、2、3、5、7 个月的含油饱和度变化图。红色代表含水饱和度最低,蓝色代表含水饱和度最高。由图 5 可知,由于注水井人工裂缝与水平井人工裂缝沟通,导致该井一开始生产就暴性水淹。因此,可以通过对注水井工作制度的调整来降低产水率,提高产油量;若是效果不明显,可以封堵目前的 4 段裂缝,在两段射孔段中间位置重新压裂。

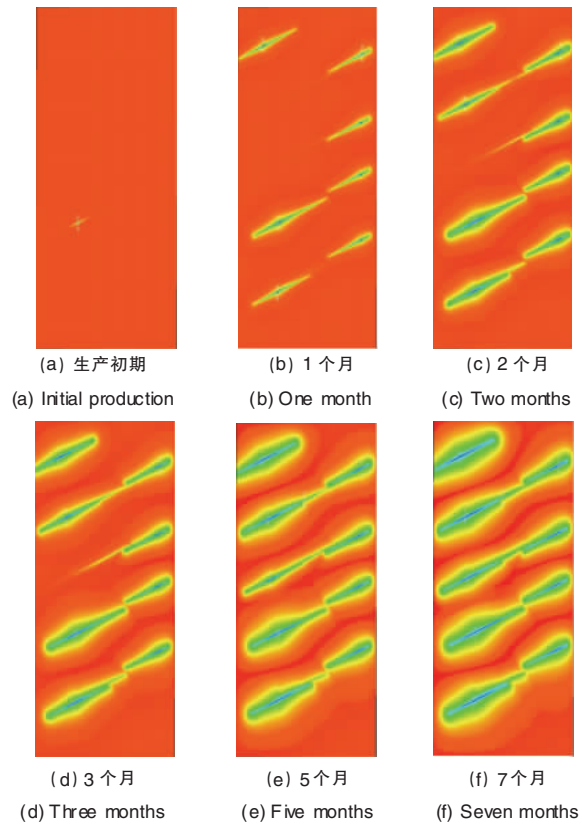


图 5 BF76-P51 井组含油饱和度变化

Fig. 5 Oil saturation change maps of Well BF76-P51 group

图 6 模拟了将现有裂缝封堵后,在现有 4 段裂缝的中间位置重新压裂 3 条裂缝后的产油量和含水率变化。由图 6 可知,实施新压裂方案后水平井含水率大幅下降,产油量大幅上升。

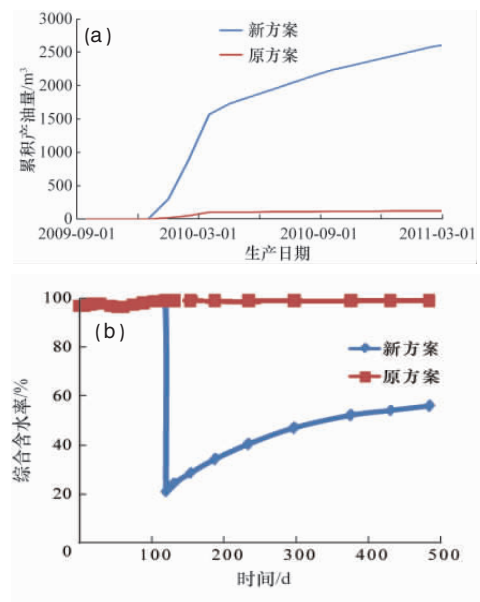
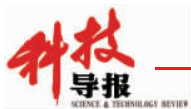


图 6 BF76-P51 井组新压裂方案与原有方案的累积产油量(a)和综合含水率(b)变化

Fig. 6 Comparison of oil production (a) and water cut (b) between new and old production schemes of Well BF76-P51



### 3.4 现场应用

根据油藏数值模拟结果,在BF76-P51井组生产3个月后将与水平井裂缝连通的注水井BF76-50关井,水平井含水率由100%下降到50%左右,日产油由0t上升至9t左右。

## 4 结论

通过建立的数值模拟方法,对比研究了裂缝与井筒不同夹角情况下的水平井产能和含水率变化,并针对实际区块进行了应用研究。

(1)建立了水平井与井筒斜交裂缝的数值模拟方法,并应用该方法建立了B6试验区水平井数值模拟模型,模型合理准确。

(2)采用建立的模型对水平井井组的生产动态进行模拟分析,认为含水率高的主要原因是水平井部分人工裂缝与注水井人工裂缝沟通,提出将部分水井关井或者封堵现有人工裂缝后,重新压裂新裂缝的调整方案。

(3)根据调整方案在现场进行应用,取得了良好的增产效果。

### 参考文献(References)

[1] 王晓泉,张守良,吴奇,等.水平井分段压裂多段裂缝产能影响因素分析[J].石油钻采工艺,2009,31(1):73-76.  
Wang Xiaoquan, Zhang Shouliang, Wu Qi, et al. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(1): 73-76.

[2] Sadpanah H, Charles T, Fulton J. Explicit simulation of hydraulic fractures in horizontal wells [C]. SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria, June 12-15, 2006.

[3] Guo G, Evans R D. Inflow performance and production forecasting of horizontal wells with multiple hydraulic fractures in low-permeability gas reservoirs [C]. SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Canada, June 28-30, 1993.

[4] 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):89-96.

Xu Yanbo, Qi Tao, Yang Fengbo, et al. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 89-96.

[5] 姜晶,李春兰,杨敏.低渗透油藏压裂水平井裂缝优化研究[J].石油钻采工艺,2008,30(4):50-51.  
Jiang Jing, Li Chunlan, Yang Min. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(4): 50-51.

[6] 王欣,段瑶瑶,鄢雪梅,等.水平井注采井网及裂缝系统优化研究[M]//2008年低渗透油气藏压裂酸化技术新进展.北京:石油工业出版社,2008:11-19.  
Wang Xin, Duan Yaoyao, Yan Xuemei, et al. Optimization of horizontal well pattern and fracture parameter[M]//Advancement of Fracturing and Acidizing in Low Permeability Oil and Gas Reservoir, 2008, Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 11-19.

[7] 王鸿勋,张士诚.水力压裂设计数值计算方法[M].北京:石油工业出版社,1998:104-113.  
Wang Hongxun, Zhang Shicheng. Numerical calculation methods of hydraulic fracturing[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 104-113.

[8] 张学文,方宏长,裴怿楠,等.低渗透油藏压裂水平井产能影响因素[J].石油学报,1999,20(4):51-55.  
Zhang Xuewen, Fang Hongchang, Qiu Yinan, et al. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 51-55.

[9] 孙良田,孙宜建,黄志文,等.低渗透油气藏水平井压裂优化设计[J].西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(3):45-48.  
Sun Liangtian, Sun Yijian, Huang Zhiwen, et al. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2009, 24(3): 45-48.

[10] 王家禄,刘玉章,江如意,等.水平井开采底水油藏水脊脊进规律的物理模拟[J].石油勘探与开发,2007,34(5):590-593.  
Wang Jialu, Liu Yuzhang, Jiang Ruiyi, et al. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 590-593.

[11] 贺丰果,岳湘安,李良川,等.底水油藏非均质性对水平井开采特性的影响[J].石油钻采工艺,2009,31(4):63-66.  
He Fengguo, Yue Xiang'an, Li Liangchuan, et al. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(4): 590-593.

[12] 王涛,赵进义.底水油藏水平井含水变化影响因素分析[J].岩性油气藏,2012,24(3):103-107.  
Wang Tao, Zhao Jinyi. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(3): 103-107.

(责任编辑 侯澄芝)



### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。