

大庆外围油田压裂水平井参数优选及渗流特征

崔茂蕾^{1,2}, 王一可³, 黄小雷⁴, 尹方春³, 陈增顺⁵, 杨正明²

1. 中国科学院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. 中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司新立采油厂, 吉林松原 138000
4. 中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司曙光采油厂, 辽宁盘锦 124114
5. 中国石化化工股份有限公司江苏油田矿业开发总公司, 江苏扬州 225009

摘要 压裂水平井已成为开采特低渗透油藏的重要手段。为深入了解压裂参数及渗流规律对水平井开发效果的影响, 针对大庆外围某特低渗透油藏水平井开发的实例, 应用特低渗透非线性渗流理论, 建立了考虑非线性渗流的数学模型, 给出已钻水平井的最优压裂参数, 研究了不同渗流规律下压裂水平井的渗流特征。结果表明, 在水平井水平段长度、压裂缝长一定的条件下, 裂缝条数和裂缝间距对开发效果的影响显著; 裂缝条数越少, 裂缝间距对水平井产能影响越大; 裂缝条数大于 3 条, 裂缝间距的影响减小; 对比了达西渗流规律和考虑启动压力梯度的非线性渗流规律下压裂水平井的渗流特征, 非线性渗流模型计算的水平井产油量较低, 见水后含水上升速度较快, 剩余油饱和度较高; 非线性渗流模型中注水井井筒附近和主流线附近的压力等值线密集, 能量消耗大, 压力梯度高, 水平井井筒附近压力梯度较大, 但低于直井; 非线性渗流模型的地层渗透率与压力梯度呈正比关系。

关键词 特低渗透; 水平井; 压裂参数; 渗流特征; 压力梯度

中图分类号 TE348

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.23.005

Fracture Parameters Optimization and Seepage Characteristics of Fracture Horizontal Well in Daqing Peripheral Oilfield

CUI Maolei^{1,2}, WANG Yike³, HUANG Xiaolei⁴, YIN Fangchun³, CHEN Zengshun⁵, YANG Zhengming²

1. Institution of Porous Flow & Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. Xinli Oil Recovery Plant, Jilin Oilfield, China National Petroleum Corporation, Songyuan 138000, Jilin Province, China
4. Shuguang Recovery Plant, Liaohe Oilfield, China National Petroleum Corporation, Panjin 124114, Liaoning Province, China
5. Jiangsu Oilfield Mineral Industry Company, China Petrochemical Corporation, Yangzhou 225009, Jiangsu Province, China

Abstract Horizontal well with fracture has become one of main methods to exploit ultra-low permeability. In order to gain the in-depth knowledge of the effect of fracture parameters and seepage pattern on horizontal well productivity, a nonlinear flow mode optimizing the fracture parameters has been established based the actual case of horizontal well exploitation in Daqing Peripheral Oilfield. The nonlinear flow theory is applied to the mode and the optimization results are provided under the constant condition of both horizon length and fracture length. The fracture number and fracture intervals have a significance impact on exploitation effect. The larger fracture number is, the more obvious the effect of fracture intervals is. However, as number of fractures exceeds three, the effect of fracture intervals is reducing. Contrast to the characteristics of nonlinear flow with that of Darcy flow, the former has the lower productivity, higher remaining oil saturation, and higher water cut as soon as water is produced. In the nonlinear flow model, pressure isopleths are concentrated, pressure gradient is higher, and energy consumption is larger around the area of wellbore and injection-production line. Horizontal well

收稿日期: 2011-06-21; 修回日期: 2011-07-24

基金项目: 国家油气重大专项 (2011ZX05013-005)

作者简介: 崔茂蕾, 博士研究生, 研究方向为低渗透油田开发, 电子邮箱: cuimaolei@163.com; 杨正明 (通信作者), 高级工程师, 研究方向为低渗透油气藏储层评价、渗流理论和提高采收率及煤层气评价, 电子邮箱: yzmhxj@263.net

has bigger pressure gradient, however, it is smaller than that for vertical well. The permeability in nonlinear flow model is directly proportional to pressure gradient.

Keywords ultra-low permeability; horizontal well; fracture parameter; seepage characteristic; pressure gradient

0 引言

近年来,压裂水平井是特低渗透油藏开发的重要方法之一,其生产能力是压裂直井的3—6倍^[1]。水平井段长度、裂缝导流能力、裂缝长度、裂缝条数是影响水平井产能的主要因素^[2]。目前对优选压裂参数的研究,主要集中在数值模拟方法和室内物理模拟方法。郎兆新等^[3]在1994年应用位势理论和叠加原理,假设每条裂缝产量相同,研究了水平井压裂后造成多条裂缝情况下的产量确定办法,得出了产量和生产压降与裂缝长度和裂缝条数的关系;张学文等^[4]在1999年利用中石油勘探开发研究院开发的多功能模型对压裂水平井产能及影响因素进行了研究;张矿生^[5]在2004年对压裂水平井生产动态数值模拟理论和计算方法进行了深入研究,建立了水平井的三维油水两相渗流模型,通过对不同油藏尺寸、裂缝位置、裂缝几何尺寸的数值模拟,评价了水平井不同生产时间的压后多缝生产动态,根据压裂经济评价模型,建立了水平井压裂裂缝条数优化数值模型,具有经济意义;袁帅等^[6]在2010年利用电解模拟实验,分析了水平段封闭条件下交错排状井网中水平井不等缝长压裂、人工裂缝数以及裂缝穿透比对单条裂缝和井网产能的影响规律,首次对单缝产能进行了物理模拟实验分析,为压裂水平井的裂缝参数优化设计提供了一定的理论依据。然而这些研究都忽视了特低渗透油藏的固有特征,即孔隙度和渗透率低,孔道细小,微观结构复杂^[7],流体在多孔介质中的渗流规律也不再符合经典的达西渗流规律^[8],介质的渗透率不再是常数,而是随着压力梯度的变化而变化^[9-12],因此在水平井压裂参数的优选中,有必要考虑这些因素带来的影响。

本文通过特低渗透油藏非线性渗流理论,即渗透率为压力梯度的函数,建立了特低渗透非线性渗流模型,针对大庆外围某特低渗透油藏水平井开发实例,建立了非线性渗流模型,对已钻水平井进行压裂参数的优选。在水平井水平段长度、压裂缝长及导流能力一定的条件下,给出适合该区块的最佳裂缝条数及裂缝间距;对比不同渗流规律下的压裂水平井的生产特征;给出了不同渗流规律下渗透率和剩余油饱和度的分布情况,为该油田水平井压裂及生产特征分析提供理论指导。

1 特低渗透油藏模型的建立

1.1 特低渗透非线性渗流理论

现场生产和大量的室内岩心实验表明,特低渗透油藏存在明显的非线性渗流特征,并在驱动压力梯度较小时,渗流特征为下凹曲线,如图1所示^[13]。其中,A为最大半径毛管的启动压力梯度,C为平均半径毛管启动压力梯度,B为最小半

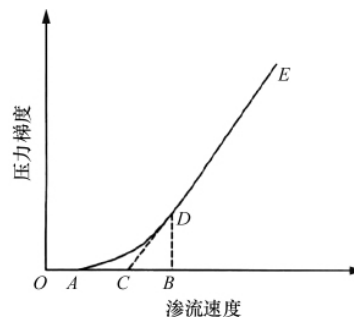


图1 特低渗透油藏流体非线性渗流曲线

Fig. 1 Nonlinear seepage curve in ultra-low permeability oilfield

径毛管启动压力梯度。分别称A、C两点对应的压力梯度为真实启动压力梯度和拟启动压力梯度。D为由非线性渗流到拟线性渗流的过渡点,直线DE对应的渗流过程为拟线性渗流,曲线AD对应的渗流过程为非线性渗流。

为了从数学上描述特低渗油藏中非线性渗流的现象,可以借助经典达西定律形式,采用实验修正的方法实现。在大量分析特低渗岩心渗流曲线形状的基础上,建立能够更为精确反映特低渗油藏中渗流特征的非线性渗流数学模型

$$v = \frac{K}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{1}{a+b|\nabla p|} \right) \quad (1)$$

其中, v 为渗流速度; K 为渗透率; μ 为黏度; ∇p 为压力梯度; b 相当于拟启动压力梯度模型中拟启动压力梯度的倒数; a 为影响非线性渗流凹形曲线段的影响因子,且 $a>0$ 。 a 、 b 值可由实验确定。当 b 无穷大时,反映了拟启动压力梯度无穷小,流体与固体的作用非常弱, $\frac{1}{a+b|\nabla p|}$ 趋于0,这时式(1)退化成为达西线性渗流模型。 a 值的大小影响非线性渗流凹形曲线的形状,当 $a=0$ 时,即为拟启动压力梯度模型,非线性渗流曲线呈直线,与压力梯度轴相交于 $1/b$ 处。

将式(1)简化为

$$v = \frac{K \left(1 - \frac{1}{a+b|\nabla p|} \right)}{\mu} \nabla p = \frac{K^*(\nabla p)}{\mu} \nabla p$$

其中, K^* 为地层渗透率,即

$$K^*(\nabla p) = K \left(1 - \frac{1}{a+b|\nabla p|} \right) \quad (2)$$

由式(2)可以看出,地层渗透率是随压力梯度变化的函数。地层渗透率的大小反映了地层的渗流能力和动用程度。地层渗透率越高,渗流能力越强,动用程度越大。通过室内岩心实验数据可以拟合出渗透率与启动压力梯度的关系式(图2),该岩心渗透率为 $1.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,拟合值 $a=0.85$, $b=35$,以此作为运动方程建立数学模型。

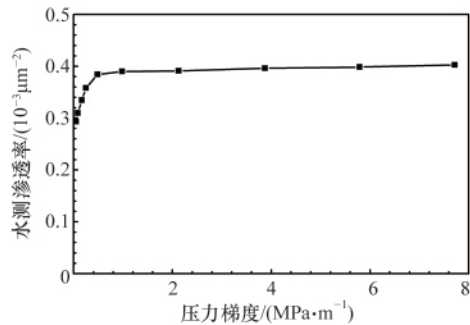


图 2 水测渗透率与压力梯度关系曲线
Fig. 2 Relationship between permeability to water and pressure gradient

1.2 模型建立

大庆外围某特低渗透油藏平均渗透率为 $1.3\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, 平均孔隙度为 13%, 含油饱和度为 55%, 有效厚度为 3m, 原油体积系数为 1.12, 油层顶深为 1550m。区块采用直井注-水平井采 300m×600m 五点法井网形式, 如图 3 所示。从该区抽提出一个典型井组作为研究区域, 包括 4 口注水井(直井)和 1 口生产井(水平井), 水平井水平段长度为 500m, 设计半缝长为 80m, 导流能力为 $400\times10^{-3}\mu\text{m}^2\cdot\text{m}$, 井底流压恒定。

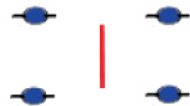


图 3 井网形式示意
Fig. 3 Well net pattern

2 数据分析及讨论

模拟方案设计了不同的裂缝条数及裂缝间距, 裂缝间采用等距的分布方式, 如表 1 所示。通过建立的非线性渗流模型, 模拟不同方案裂缝参数的生产情况; 分析相同裂缝条数

表 1 不同裂缝条数及裂缝间距模拟方案
Table 1 Simulation proposal for different fracture numbers and fracture intervals

模拟方案	裂缝条数	裂缝间距/m
方案 1	2	80
方案 2	2	100
方案 3	2	150
方案 4	2	200
方案 5	3	80
方案 6	3	100
方案 7	3	135
方案 8	4	80
方案 9	4	100
方案 10	5	80
方案 11	6	70
方案 12	7	60

不同裂缝间距对水平井日产油量的影响; 优选水平井的合理裂缝条数; 在裂缝条数及裂缝间距相同的条件下, 对比非线性渗流和达西渗流两种不同渗流规律下水平井日产油量、剩余油饱和度和地层渗透率分布的差异。

2.1 裂缝间距、裂缝条数对水平井开发效果的影响

在非线性渗流模型上, 分别模拟计算了 2, 3, 4 条裂缝, 不同裂缝间距的方案。图 4 给出了不同裂缝条数下, 裂缝间距对水平井产能的影响。结果表明, 当压裂 2 条裂缝时, 水平井日产油量随裂缝间距的增加而增加, 其中裂缝间距为 80m 的产能最低, 间距 100m 次之, 间距 150 和 200m 日产油量最高, 且二者相差不大。这是因为裂缝间距较小时, 裂缝间流体渗流的干扰作用就会加剧, 裂缝间形成一个低压区, 这个区间采出油量是有限的, 而随着裂缝间距的增加, 缝间干扰作用减弱, 产油量增加, 当间距大于 150m 后, 缝间干扰基本不存在, 且每条裂缝对产量的贡献发挥到最大。

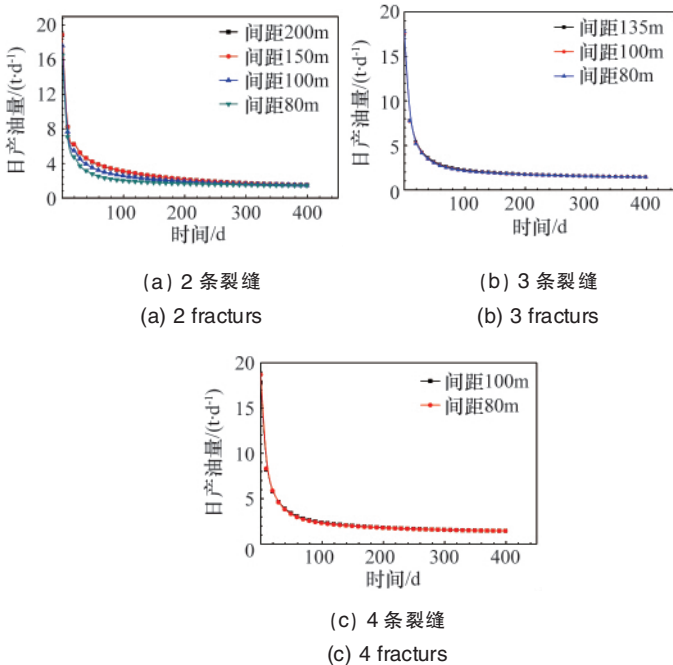


图 4 裂缝间距对水平井产能的影响
Fig. 4 Effect of fracture intervals on the productivity of horizontal well

当压裂 3 条、4 条裂缝时, 不同裂缝间距产油量相差不大, 这是因为裂缝的增加, 减小了裂缝间距的变化范围, 在这个范围内每条裂缝对产量的贡献基本不变。

图 5 对比了相同裂缝间距, 不同裂缝条数对开发效果的影响。裂缝数越多, 油井的产能越高。由 2 条增加到 4 条的过程中, 油井产能上升幅度比较大; 由 4 条增加到 7 条的过程中, 油井产能上升幅度降低, 说明裂缝条数越多, 裂缝条数增加对产能的贡献逐渐降低, 缝间干扰对产能带来的不利影响逐渐增加, 说明在现有注采关系下, 存在最佳的裂缝条数。本例选择 4—5 条裂缝为最佳。

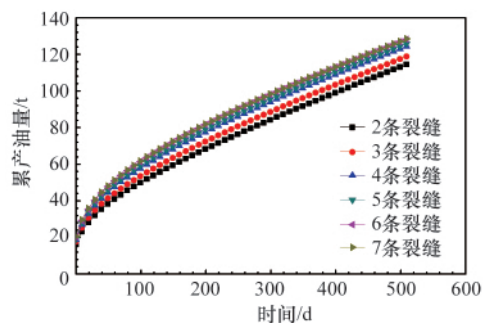


图5 裂缝条数对水平井产能的影响

Fig. 5 Effect of fracture numbers on horizontal well productivity

2.2 渗流规律对水平井开发效果的影响

建立达西渗流模型和非线性渗流模型,水平井设计5条裂缝,80m的裂缝间距,对比两种渗流规律下水平井的生产特征。由图6和图7中可以看出,在生产初期,达西模型计算的油井产油量高于考虑渗透率随启动压力梯度变化的非线性渗流模型计算值,而后者计算的油井含水率高于前者;随着开发时间的增加,二者油井产油量接近,而非线性渗流模型计算的含水率快速上升,并远高于达西模型的计算值。这与实际特低渗透油田开发过程中出现的油田见水后含水率迅速上升的情况一致。

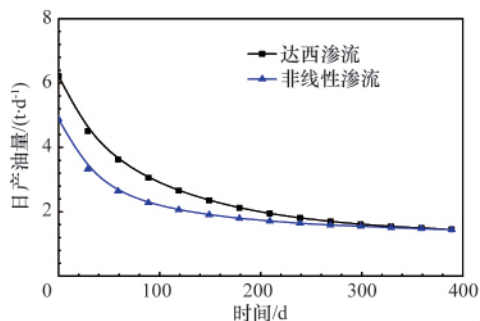


图6 不同渗流规律日产油量曲线

Fig. 6 Oil daily production under different flow modes

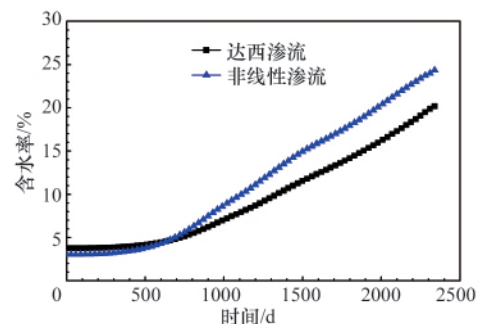


图7 不同渗流规律含水率曲线

Fig. 7 Water cut under different flow modes

图8给出了两种渗流规律下,地层压力、压力梯度、剩余油饱和度分布图。由压力分布(图8(a))可以看出,在相同注采条件下,非线性渗流规律下水井附近出现较大面积的高压区域,说明注水压力传播速度慢于达西渗流模拟结果。非线

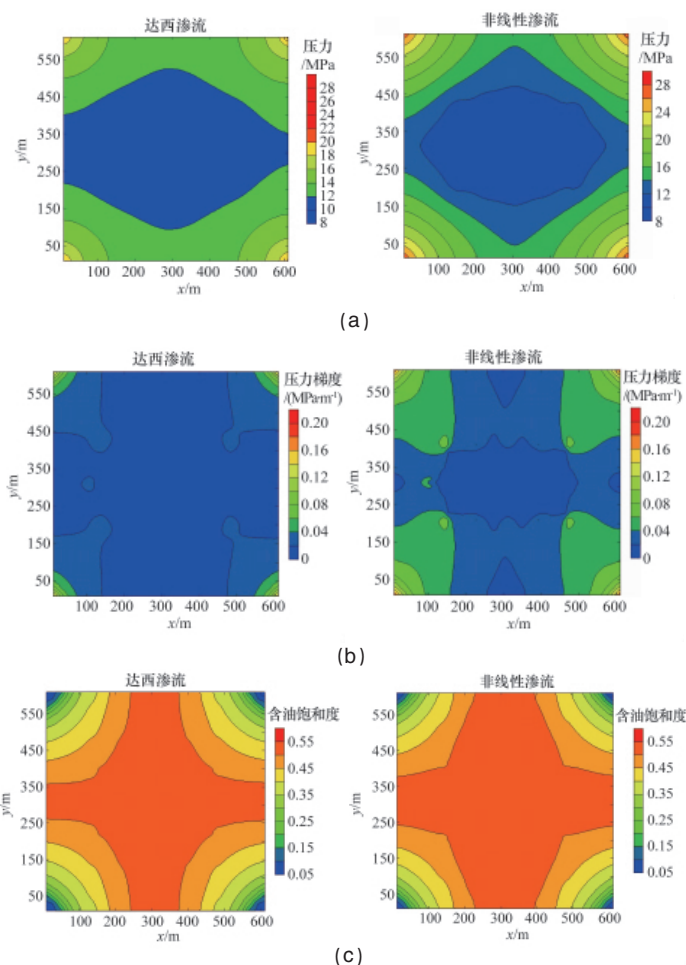


图8 不同渗流规律下压力、压力梯度、
剩余油饱和度分布

Fig. 8 Distribution of pressure, pressure gradient and remaining oil saturation under different flow modes

性渗流规律下的地层压力等值线较为密集,说明非线性渗流规律使得流体在地层中的流动消耗了更多的驱动能量,注水井井筒附近的等值线也进一步验证了在实际特低渗透油藏开发过程中出现的注水难的现象。对比压力梯度分布(图8(b))可以看出,非线性渗流规律下注水井井筒附近和主流线附近的压力梯度较达西渗流计算值高,这也是由于非线性渗流规律使得流体在地层中的流动消耗了更多的驱动能量,降低了水驱的效率,同时使剩余油饱和度高于后者(图8(c))。

非线性渗流模型中水平井井筒附近的压力梯度高于达西渗流模型,同样说明非线性渗流规律使得流体在地层中的流动消耗了更多的驱动能量。由于水平井的泄油面积比较大,裂缝条数较多,分布在裂缝两端存在一个低压区,使得低压区与井底间的压差较小(这一点与直井生产井不同),与直井相比压力梯度较小。此外,由于流体中水的流动阻力较小,水平井一经见水就难以控制,符合实际水平井开发的特征。

图9给出了非线性渗流模型的 x 方向(图9(a))、 y 方向(图9(b))以及两方向合成(图9(c))地层渗透率分布。 x 方向上沿着裂缝的地层渗透率较大, y 方向上垂直裂缝的地层渗

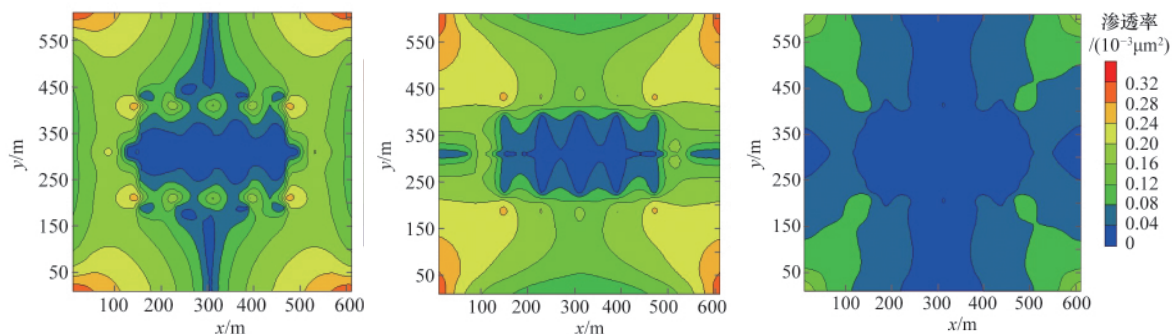


图9 非线性渗流模型地层渗透率分布

Fig. 9 Distribution of permeability under the nonlinear flow mode

透率较大,从合成地层渗透率的分布图可以看出,注水井井筒附近和主流线附近的值较大,储层动用程度高,渗流能力强,同样是由于注水井井筒附近和主流线附近压力梯度较大造成的,其他区域由于压力梯度较小使得动用程度小;水平井作为生产井,井筒附近的地层渗透率较小,主要因为裂缝的存在形成了低压区,压力梯度较小的缘故。

总之,在非线性模型中注水井井筒和人工压力裂缝附近地层渗透率高,动用程度高,远离井筒和主流线地层渗透率低,动用程度低,这与实际特低渗透油藏开发过程中出现的情况基本一致,说明考虑渗透率随压力梯度变化的非线性模型适合应用在特低渗透油藏中。

3 结论

(1) 应用非线性数值模拟软件对实际油田水平井的压裂参数进行了优选。在现有的注采情况下裂缝数超过3条时,裂缝间距对开发效果影响较小;合理裂缝条数为4—5条。

(2) 与达西渗流规律相比,非线性渗流模型计算的水平井产油量较低,见水后含水上升速度较快,剩余油饱和度较高;注水井井筒附近和主流线附近的压力等值线密集,压力梯度大,能量消耗大,说明地层能量主要消耗在井底附近,这一点符合特低渗透油藏的开发特征;水平井井筒附近压力梯度较大,但低于直井。

(3) 地层渗透率反映了地层的渗流能力和动用程度,非线性渗流模型的地层渗透率分布与压力梯度呈正比关系。在注水井井筒附近和主流线附近地层渗透率都较大,渗流能力较好,而水平井井底附近地层渗透率较小。

参考文献 (References)

- [1] 王书礼,唐许平,李伯虎.低渗透油藏水平井开发设计研究[J].大庆石油地质与开发,2001,20(1):23-25.
Wang Shuli, Tang Xuping, Li Bohu. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2001, 20(1): 23-25.
- [2] 马新仿,樊凤玲,张守良.低渗气藏水平井压裂裂缝参数优化[J].天然气工业,2005,25(9):61-63.
Ma Xinfang, Fan Fengling, Zhang Shouliang. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(9): 61-63.
- [3] 郎兆新,张丽华,程林松.压裂后水平井产能研究[J].石油大学学报:

自然科学版,1994,18(2):43-46.

Lang Zhaoxin, Zhang Lihua, Cheng Linsong. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 1994, 18(2): 43-46.

- [4] 张学文,方宏长,裴泽楠,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.

- [5] 张矿生.压裂水平井生产动态数值模拟研究[D].成都:西南石油学院,2004.

Zhang Kuangsheng. Numerical simulation research on productivity of hydraulically fractured horizontal well [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004.

- [6] 袁帅,李春兰,曾宝全,等.压裂水平井裂缝参数优化实验[J].石油钻探技术,2010,38(4):99-103.

Yuan Shuai, Li Chunlan, Zeng Baoquan, et al. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(4): 99-103.

- [7] 李道品.低渗透油田开发概论[J].大庆石油地质与开发,1997,16(3):33-37.

Li Daopin. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 1997, 16(3): 33-37.

- [8] 黄延章.低渗透油层渗流机理[M].北京:石油工业出版社,1998.

Huang Yanzhang. Seepage mechanism of low permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.

- [9] 于荣泽,卞亚南,杨正明,等.低渗透多孔介质变渗透率数值模拟方法[J].科技导报,2010,28(20):29-33.

Yu Rongze, Bian Yanan, Yang Zhengming, et al. *Science and Technology Review*, 2010, 28(20): 29-33.

- [10] 韩洪宝,程林松,张明禄.特低渗透油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(6):49-53.

Han Hongbao, Cheng Linsong, Zhang Minglu. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2004, 28(6): 49-53.

- [11] 程时清,陈明卓.油水两相低速非达西渗流数值模拟[J].石油勘探与开发,1998,25(1):41-43.

Cheng Shiqing, Chen Mingzhuo. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(1): 41-43.

- [12] 李中峰,何顺利.低渗透储层非达西渗流机理探讨[J].特种油气藏,2005,12(2):35-38.

Li Zhongfeng, He Shunli. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2005, 12(2): 35-38.

- [13] 黄延章.低渗透油层非线性渗流特征[J].特种油气藏,1997,4(1):9-14.

Huang Yanzhang. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 1997, 4(1): 9-14.

(责任编辑 刘志远)