

文章编号: 0253-2697(2009)05-0727-04

天然微裂缝发育的低渗透油藏数值模拟

吴忠宝¹ 胡文瑞² 宋新民¹ 冉启全¹ 甘俊奇¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油企业协会 北京 100724)

摘要: 由于天然微裂缝难以识别和定量描述, 在建立量化的微裂缝地质模型时, 采用双重介质模型进行油藏数值模拟研究存在较大困难, 注水开发中微裂缝的动态开启和闭合也难以进行模拟研究。根据等值渗流阻力法原理, 利用微裂缝的统计特征参数, 如裂缝线密度、裂缝长度等建立天然微裂缝发育低渗透油藏的等效连续介质地质模型, 根据地应力和现场注水指示曲线, 建立了裂缝传导率与地层压力的方程, 可以等效模拟注水开发中的微裂缝开启和闭合现象。以长庆西峰油田西137井区为例, 模拟研究了井网及注水开发动态, 与现场动态分析结果一致。

关键词: 天然微裂缝; 等值渗流阻力法; 线密度; 油藏数值模拟; 低渗透油藏; 井网

中图分类号: TE319

文献标识码: A

Numerical simulation on low permeability reservoir with abundant natural micro-fractures

WU Zhongbao¹ HU Wenrui² SONG Xinmin¹ RAN Qiquan¹ GAN Junqi¹

(1. PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China;
2. China Petroleum Enterprise Association, Beijing 100724, China)

Abstract: It is very difficult to do numerical simulation on oil reservoir using a double permeability (or double porosity) system, because it is difficult to quantitatively identify and describe the natural micro-fractures. It is also difficult to simulate the phenomenon of the dynamic opening and closing of micro-fractures. The geologic model of the equal effective continuous medium was built according to the principle of equal filtration resistance and using the statistical data of the fractures, such as linear density of fracture, length of fracture. The equations of fracture conductivity and reservoir pressure were built according to the field stress and the indicating curves of water flooding. The status of dynamic opening and closing of the micro-fractures can be simulated using those equations. The X137 Block in Xifeng Oilfield was simulated to optimize the well pattern and water flooding situation. The simulation result consists with the result of the dynamic field analysis.

Key words: natural micro-fracture; equal filtration resistance method; linear density; numerical simulation of reservoir; low-permeability reservoir; well pattern

天然微裂缝在低渗透油田的开发中扮演着重要的角色^[1-7], 一方面由于微裂缝的存在, 改善了低渗透油藏的渗流条件, 另一方面, 高压注水导致微裂缝开启, 注入水沿裂缝水窜, 油井过早水淹, 有必要针对微裂缝发育低渗透油藏开展油藏数值模拟研究, 指导现场注水开发技术政策的制定。但由于微裂缝难以识别和定量描述, 建立精确的量化裂缝地质模型存在着诸多理论和现实困难。笔者采用等值渗流阻力法, 根据裂缝统计特征数据量化建立等效的数值模拟模型, 并通过建立裂缝传导率与地层压力的关系曲线等效模拟注水开发中的裂缝开启和闭合现象, 成功实现该类油藏的数值模拟研究。

1 天然微裂缝等效介质连续模型

实际低渗透油藏的微裂缝分布往往是不连续分布的, 将模型设想为由裂缝集中区和无裂缝区组成, 油藏整体渗透率由裂缝集中区域整体渗透率与无裂缝区域渗透率串并联而成(图1)。

1.1 裂缝集中区域等效渗透率

储层中的任一模拟区域, 裂缝为垂直裂缝且相互平行, 模拟区域长、宽、高分别为 l 、 w 、 h , 裂缝宽度为 w_f , 线密度为 d_f , 长度和高度与基质一致, 裂缝渗透率为 K_f , 考虑储层基质的各向异性, 基质不同方向渗透率分别为 K_x 、 K_y 、 K_z , 裂缝延伸方向为 x 轴方向。

基金项目: 中国石油天然气股份公司科技攻关项目(2008B-0901)资助。

作者简介: 吴忠宝, 男, 1970年7月生, 1993年毕业于石油大学(华东)油藏工程专业, 2007年获中国地质大学(北京)能源学院油气田开发工程专业博士学位, 现为 中国石油勘探开发研究院在读博士后, 研究方向为低渗透油田开发理论与方法。E-mail: wuzhongbao@petrochina.com.cn

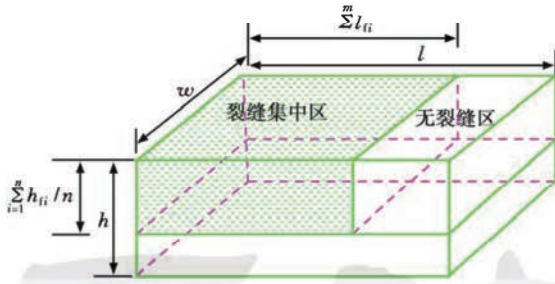


图1 等效连续介质模型示意图

Fig. 1 The sketch of equal-effective continuous medium model

根据等值渗流阻力法原理^[8-9],沿裂缝延伸方向的等效渗透率 K_{xc} 为

$$K_{xc} = K_{mx}(1 - d_{fwf}) + K_f d_{fwf} \quad (1)$$

垂直于裂缝延伸方向的等效渗透率 K_{yc} 为

$$K_{yc} = \frac{K_{mx} K_f}{K_f + (K_{my} - K_f) d_{fwf}} \quad (2)$$

纵向上等效渗透率 K_{zc} 为

$$K_{zc} = K_{mz}(1 - d_{fwf}) + K_f d_{fwf} \quad (3)$$

1.2 含裂缝储层的整体渗透率

在裂缝发育区等效渗透率研究基础上,进一步考虑裂缝平面及纵向上的不连续性,假设裂缝延伸方向上有 m 组裂缝,每组裂缝的平均长度为 l_{fi} ($l_{fi} \leq l$),同时假设裂缝纵向上有 n 组裂缝,每组裂缝平均深度为 h_{fi} ($h_{fi} \leq h$),裂缝延伸方向总长度为 $\sum_{i=1}^m l_{fi}$,裂缝纵向上平均厚度为 $\sum_{i=1}^n h_{fi}/n$ 。

1.2.1 沿裂缝延伸方向储层等效渗透率

设裂缝深度范围内,裂缝延伸方向储层渗透率为 K_{xcm} ,根据等值渗流阻力法原理得

$$\frac{l}{K_{xcm}} = \frac{\sum_{i=1}^m l_{fi}}{K_{xc}} + \frac{l - \sum_{i=1}^m l_{fi}}{K_{mx}} \quad (4)$$

设裂缝平面连通系数为

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^m l_{fi}}{l}$$

则式(4)可表示为

$$K_{xcm} = \frac{K_{mx} K_{xc}}{K_{xc} + C_x(K_{mx} - K_{xc})} \quad (5)$$

在纵向上应用等值渗流阻力法原理,设裂缝延伸方向储层总体渗透率为 K_{xcg} ,则

$$K_{xcg} \cdot h = K_{xcm} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n h_{fi}}{n} + K_{mx} \left(h - \frac{\sum_{i=1}^n h_{fi}}{n} \right) \quad (6)$$

设裂缝纵向连通系数为

$$C_z = \frac{\sum_{i=1}^n h_{fi}}{nh}$$

则式(6)可转换为

$$K_{xcg} = K_{xcm} \cdot C_z + K_{mx}(1 - C_z) \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)得

$$K_{xcg} = \frac{K_{mx} K_{xc} C_z}{K_{xc} + C_x(K_{mx} - K_{xc})} + K_{mx}(1 - C_z) \quad (8)$$

1.2.2 垂直于裂缝延伸方向储层等效渗透率

设裂缝深度范围内,垂直裂缝延伸方向储层渗透率为 K_{ycm} ,根据等值渗流阻力法原理得

$$K_{ycm} = K_{yc} \cdot C_x + K_{my}(1 - C_x) \quad (9)$$

在纵向上应用等值渗流阻力法原理,设垂直于裂缝延伸方向储层整体渗透率为 K_{yeg} ,则

$$K_{yeg} = K_{ycm} \cdot C_z + K_{my} \cdot (1 - C_z) \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)得

$$K_{yeg} = [K_{yc} \cdot C_x + K_{my}(1 - C_x)] C_z + K_{my}(1 - C_z) \quad (11)$$

1.2.3 纵向储层等效渗透率

设裂缝深度范围内,纵向上储层等效渗透率为 K_{zcm} ,根据等值渗流阻力法原理得

$$K_{zcm} = K_{zc} \cdot C_x + K_{mz} \cdot (1 - C_x) \quad (12)$$

在纵向上应用等值渗流阻力法原理,设纵向储层等效渗透率为 K_{zeg} ,则

$$K_{zeg} = \frac{K_{zcm} K_{mz}}{K_{mz} C_z + (1 - C_z) K_{zcm}} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)得

$$K_{zeg} = \frac{[K_{zc} C_x + K_{mz}(1 - C_x)] K_{mz}}{K_{mz} C_z + (1 - C_z) [K_{zc} C_x + K_{mz}(1 - C_x)]} \quad (14)$$

以岩心统计微裂缝参数为基础(表1),根据式(8)、式(11)和式(14),可计算出含裂缝低渗透油藏 x, y, z 三个方向的整体等效渗透率。结果表明,在考虑了微裂缝对油藏整体渗透率贡献后,相对于油藏基质,裂缝延伸方向及纵向整体渗透率增幅较大,而垂直裂缝延伸方向的水平渗透率增幅较小。因此具有明显方向性的微裂缝增加了储层的各向异性,决定着该类油藏的井网形式和注水技术政策。

表1 西峰油田西137井区储层和流体物性参数

Table 1 Reservoir and fluid parameters of X137 Block in Xifeng Oilfield

参数	参数值	参数	参数值
探明地质储量/ 10^4 t	208.6	原始地层压力/MPa	18.1
含油面积/ km^2	2.67	饱和压力/MPa	11.7
平均含油饱和度/%	51.0	原油体积系数/ $(\text{rm}^3 \cdot \text{sm}^{-3})$	1.31
平均孔隙度/%	10.5	裂缝平均渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	20.0
平均渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	1.07	微裂缝线密度/(条 $\cdot \text{m}^{-1}$)	1.15
地层原油黏度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	1.21	裂缝平均长度/m	7.5
地面原油密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.858	裂缝纵向穿透比	0.65

2 天然微裂缝开启压力

地层应力场研究表明,西峰油田主应力场方向为北东东 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 方向,微裂缝方向基本与主应力方向一致,天然裂缝多为高角度裂缝,因此天然裂缝的开启主要受水平主应力的影响,其裂缝开启压力公式为

$$p = H [\sin\phi(F_{\max} - F_{\min}) + F_{\min}] \quad (15)$$

式中: p 为裂缝开启压力, MPa; H 为油层某一点深度, m; F_{\max} 为最大水平主应力梯度, MPa/m; F_{\min} 为最小水平主应力梯度, MPa/m; ϕ 为裂缝走向与最大水平主应力夹角。

根据式(15)计算得到西峰油田微裂缝开启压力为 34.8 MPa。从注水指示曲线可以看出(图 2),当注水井注水量较小时,井口注入压力随日注水量的增加压力上升明显,而当注水压力上升到 14 MPa 左右时,视吸水指数突然增大,曲线变缓,出现明显的拐点。表明此时地层微裂缝开启,西峰油田微裂缝地面开启压力在 14 MPa 左右。考虑井筒摩阻,折算井底流压在 35 MPa 左右。

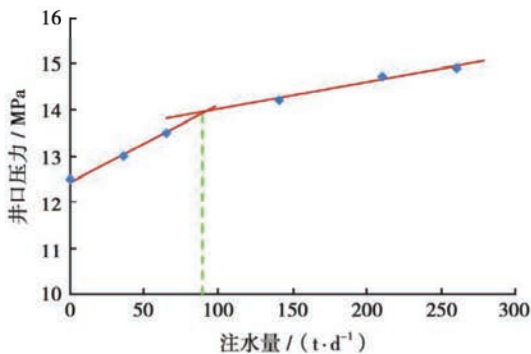


图 2 西峰油田注水指示曲线

Fig. 2 Water-injection indication curve of Xifeng Oilfield

根据图 2 可看出,当注水压力达到裂缝开启压力后,地层视吸水指数可达到未开启时的 5 倍。为了模拟这种现象,可建立注水井沿最大主应力方向网格(微裂缝发育)无因次传导率与地层压力的关系方程,从而可通过油藏数值模拟研究裂缝的开启和闭合对注水开发的影响。不考虑微裂缝的压敏效应,方程可表示为

$$K_D = \begin{cases} 1 & (p_c < p_k) \\ 5 & (p_c \geq p_k) \end{cases} \quad (16)$$

式中: K_D 为含裂缝网格无因次传导率; p_c 为含裂缝网格压力, MPa; p_k 为裂缝开启压力,取值为 35.0 MPa。

3 开发技术政策数值模拟

采用斯仑贝谢公司产品 Eclipse 软件并利用上述

等效连续介质模型对西峰油田西 137 井区进行油藏数值模拟,网格划分 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,网格方向为北东 75° ,模拟条件为定井底流压,储层及流体物性参数见表 1。

3.1 井排方向

低渗透油藏大量研究成果及现场实践经验均表明,对于裂缝发育的油藏,裂缝发育方向是井排方向主控因素。区域地质研究表明,鄂尔多斯盆地油藏裂缝具有明显的方向性^[10-12]。根据测试结果并结合区域最大主应力和裂缝方位分布情况表明,西峰油田西 137 井区长 8 油藏最大主应力和裂缝方位为北东 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$,井排方向与裂缝方向一致,因此方案部署注水井排方向为北东 75° 方向。

3.2 井网形式

西峰油田西 137 井区生产井均为压裂后投产且微裂缝发育,因此应选择适应裂缝发育油藏的井网形式。

油藏数值模拟研究表明,在相同注采条件下,由于菱形反九点井网采油井较多,初期日产量较高,但由于地层能量补充不足,产量递减速度快;而五点井网注水井较多,地层能量补充快,生产井受效后产量逐步上升(图 3),评价期内累积产油量最高;矩形井网由于采

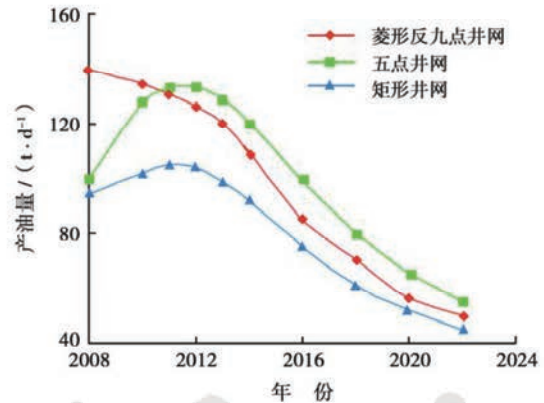


图 3 不同井网形式产油量对比

Fig. 3 Oil production comparison of different well patterns

油井较少,采油速度和累积产油量最低。同时,菱形井网由于对角线方向油井与裂缝延伸方向一致,水窜较快,含水率上升速度最快(图 4);而五点法井网由于注水井较多,在相同注采条件下单井平均注入量较少,温和注水有利于控制含水上升速度;矩形井网由于产量较低,含水率比五点井网高但比菱形反九点井网低。

研究结果表明,五点井网温和注水可有效控制含水上升速度;且由于注水井较多,压力保持水平较高,可有效建立注采压力驱替系统,单井产量较高,评价期

内采出程度最高,因此五点井网系统为该区最佳井网形式。针对该类油藏,现场开发中由于储层裂缝发育程度和发育区域不确定,初期多采用菱形反九点井网,后期对角线方向油井含水上升后转注成线状注水,井网形式由菱形反九点井网转换为五点井网,与油藏数值模拟结果一致。

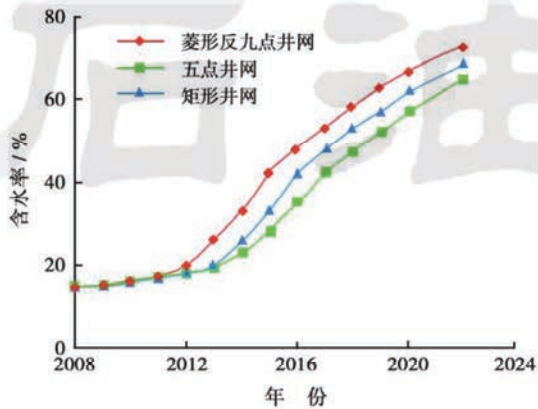


图4 不同井网形式含水率对比

Fig. 4 Water cut comparison of different well patterns

3.3 注水时机

数值模拟研究表明,超前注水1个月,初期单井产能和采油速度偏低;超前注水超过6个月,初期单井产能较高,但由于地层压力保持水平过高,油藏微裂缝开启,含水上升幅度加快,产量递减快;而超前注水3~6个月,可有效建立驱替压力系统,单井产量提高,同时可有效避免微裂缝开启含水上升幅度过快,延长稳产期(图5),因此超前注水以3~6个月为佳。

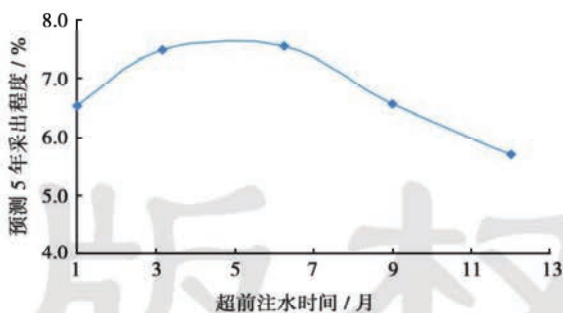


图5 不同超前注水时间采出程度对比

Fig. 5 Comparison of degree of reserve recovery in different advanced water injection period

西峰油田现场动态资料统计结果表明,由于地层能量不够,超前注水1~3个月未能完全建立有效驱替压力系统,产量递减较快;超前注水6个月以上,油井含水上升速度快;超前注水3~6个月时初期单井产能较高,产量递减率低。现场动态统计结果与数值模拟结果一致。

3.4 注水压力

当注水压力低于微裂缝开启压力(35 MPa)时,含水上升速度比较平缓;当注水井井底压力大于35 MPa后,微裂缝开启,含水率急剧增加(图6)。当注水压力低于35 MPa时,高含水饱和度集中在注水井附近,而当注水压力大于微裂缝开启压力后,微裂缝开启,裂缝延伸方向含水饱和度连片分布;同时注水量大幅增加,油井含水率大幅增加。数值模拟研究表明,注水井井底流压不易大于微裂缝开启压力,与生产动态分析结果一致,说明建立的模拟模型可靠。

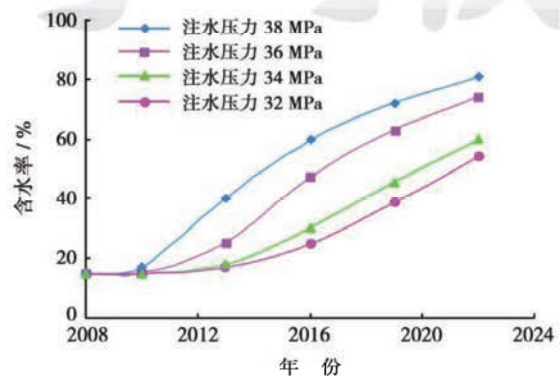


图6 不同注水压力下含水率对比

Fig. 6 Water cut comparison at different water injection pressure

4 结论

(1) 采用等值渗流阻力法建立了油藏的等效连续介质模型,从数值模拟角度等效考虑了微裂缝产生的储层渗透率各向异性问题,为该类油藏的数值模拟研究提供了基础理论模型。

(2) 建立了微裂缝网格传导率与地层压力关系方程,从油藏数值模拟角度等效考虑了微裂缝在高压注水下的开启和关闭问题。

(3) 采用油藏数值模拟方法研究了微裂缝发育低渗透油藏的合理井网及合理注水开发技术政策,研究结果与现场动态分析结果一致。

(4) 等效连续介质模型是以油藏微裂缝的统计参数为基础,根据等值渗流阻力法原理推导而得的,它适用于以发育微裂缝为主的低渗透油藏,不适用于以发育显裂缝、大裂缝为主的裂缝性油藏。

参考文献

- [1] Naval G, Subhash S. A theoretical criterion for fracturing fluids to transport proppant during a stimulation treatment[R]. SPE 71663, 2001.

(下转第734页)

参 考 文 献

- [1] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 58-79.
Huang Yanzhang. Fluid mechanics in low-permeability reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 58-79.
- [2] J·贝尔. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞牛, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983: 91-144.
Bear J. Dynamics of fluids in porous media[M]. Translated by Li Jingsheng. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983: 91-144.
- [3] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 4-13.
Li Daopin. The development of the low permeability sandstone oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 4-13.
- [4] 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, 29(2): 256-261.
Ji Bingyu, Li Li, Wang Chunyan. Oil production calculation for areal well pattern of low-permeability reservoir with non-Darcy seepage flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 256-261.
- [5] 时宇, 杨正明, 杨开菊, 等. 低渗透油藏非线性两相渗流研究[J]. 力学与实践, 2008, 30(5): 16-18.
Shi Yu, Yang Zhengming, Yang Kaiju, et al. The study of two phases non-linear flow in low permeability reservoir[J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(5): 16-18.
- [6] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 25-55.
Ge Jiali. The modern mechanics of fluids flow in oil reservoir (Volume I) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 25-55.
- [7] 邓英尔, 刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 72-76.
Deng Ying'er, Liu Ciqun. Mathematical model of nonlinear flow law in low permeability porous media and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 72-76.
- [8] 杨清立. 特低渗透油藏非线性渗流理论及其应用[D]. 北京: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2007.
Yang Qingli. Nonlinear flow theory in ultra-low permeability reservoirs and its application[D]. Beijing: Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics of CAS, 2007.
- [9] 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与展望[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(4): 57-62.
Feng Wenguang. Review and prospect of non-Darcy low seepage [J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(4): 57-62.
- [10] 杨正明, 姜汉桥, 朱光亚, 等. 低渗透含水气藏储层评价参数研究[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 251-255.
Yang Zhengming, Jiang Hanqiao, Zhu Guangya, et al. Research on reservoir evaluation index for low-permeability water-bearing gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 251-255.
- (收稿日期 2008-12-04 改回日期 2009-02-11 编辑 黄小娟)
- (上接第 730 页)
- [2] Sung W, Entekin T. Performance comparison of vertical and horizontal hydraulic fractures and horizontal boreholes in low permeability reservoirs: A numerical study[R]. SPE 16407, 1987.
- [3] Bargas C L. The Effect of vertical fractures on areal sweep efficiency in adverse mobility ratio floods[R]. SPE 17609, 1988.
- [4] 周文, 邓虎成, 单钰铭, 等. 断裂(裂缝)面的开启及闭合压力实验研究[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 277-283.
Zhou Wen, Deng Hucheng, Shan Yuming, et al. Experiment research on open and closed pressure of fault(fracture) [J]. 2008, 29(2): 277-283.
- [5] 韩德金, 张凤莲, 周锡生, 等. 大庆外围低渗透油藏注水开发调整技术研究[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 83-86, 91.
Han Dejin, Zhang Fenglian, Zhou Xisheng, et al. Study on adjustment technology of waterflood development of low-permeability reservoirs in the periphery of Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 83-86, 91.
- [6] 黄继新, 彭仕宓, 王小军, 等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 65-69.
Huang Jixin, Peng Shimu, Wang Xiaojun, et al. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 65-69.
- [7] 吕爱民, 姚军. 裂缝性碳酸盐岩底水油藏合理打开程度与合理井距[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 97-100.
L Aimin, Yao Jun. Rational perforating level and well spacing for fractured carbonate reservoirs with bottom water[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1): 97-100.
- [8] 刘慧卿. 油藏数值模拟方法专题[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 127-132.
Liu Huiqing. Topic of numerical simulation of oil reservoir [M]. Dongying: Press of the University of Petroleum, China, 2001: 127-132.
- [9] 葛家理, 宁正福, 刘月田, 等. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 313-317.
Ge Jiali, Ning Zhengfu, Liu Yuetian, et al. The percolating flow mechanics of reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 313-317.
- [10] 郝明强, 刘先贵, 胡永乐, 等. 微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 93-98.
Hao Mingqiang, Liu Xiangui, Hu Yongle, et al. Reservoir characteristic of micro-fractured ultra-low permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 93-98.
- [11] 文华国, 郑荣才, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地白豹-华池地区长 6 砂岩储层特征[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 46-51.
Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Chen Hongde, et al. Characteristic of Chang 6 sandstone reservoir in Baibao-Huachi region of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 46-51.
- [12] 张君峰, 兰朝利. 鄂尔多斯盆地榆林-神木地区上古生界裂缝和断层分布及其对天然气富集区的影响[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 172-177.
Zhang Junfeng, Lan Chaoli. Fractures and faults distribution and its effect on gas enrichment areas in Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 172-177.
- (收稿日期 2009-01-20 改回日期 2009-04-07 编辑 黄小娟)