

低渗透储层水驱油渗流阻力特征

苏海波¹,于金彪¹,张同伍²,张明安¹,刘洋³

(1.中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015; 2.中国石油长庆油田分公司 油气工艺研究院,陕西 西安 710018; 3.西安理工大学 理学院,陕西 西安 710048)

摘要:低渗透储层物性差、孔喉细小,水驱油过程中渗流阻力较大,注采井间难以形成有效的驱替压力梯度,建立渗流阻力的描述方法、研究渗流阻力的影响因素和变化特征对低渗透储层注水开发具有重要意义。在油水流动质量守恒定律的基础上,建立了低渗透储层水驱油渗流阻力梯度数学模型,应用水驱油渗流阻力梯度变化率函数分析水驱油渗流阻力梯度的变化特征,为低渗透储层中水驱油渗流阻力梯度的描述提供一种宏观表征方法。理论分析表明:低渗透储层水驱油渗流阻力梯度呈非线性特征,随着含水饱和度的增加水驱油渗流阻力梯度先增加后减小。低渗透储层注水开发存在最大渗流阻力梯度,与油相粘度、储层渗透率和注入速率相关;低渗透储层注水速率越大,需要克服的最大渗流阻力越大;油相粘度越大,最大渗流阻力越大;储层渗透率越低,最大渗流阻力越大。

关键词:低渗透储层 驱替压力梯度 非线性渗流阻力梯度 最大渗流阻力梯度 渗流阻力梯度变化率

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Features of seepage resistance during water flooding in low permeability reservoir

SU Haibo¹, YU Jinbiao¹, ZHANG Tongwu², ZHANG Ming'an¹, LIU Yang³

(1.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2.Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an City, Shaanxi Province, 710018, China; 3.School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an City, Shaanxi Province, 710048, China)

Abstract: Low permeability reservoir has poor physical properties and small pore throat, so it has great seepage resistance in the process of water flooding. It is difficult to establish an effective displacement pressure gradient between injection wells and production wells. It is very important to establish a description method about seepage resistance and study the influencing factors and feature of seepage resistance change of water flooding in low permeability reservoirs. A mathematical model of seepage resistance gradient of the water flooding in the low permeability reservoir was established based on the law of conservation of mass flow of oil and water. The variation feature of the seepage resistance gradient was analyzed by the function of the change rate of seepage resistance gradient, which provides a macroscopic characterization method of seepage resistance gradient of water flooding in low permeability reservoir. Theoretical analysis shows that the seepage resistance gradient shows nonlinear feature in the process of water flooding in low permeability reservoir, which increases first and then decreases with the increase of water saturation. There is a maximum seepage resistance gradient in water flooding of low permeability reservoir, which is related to water injection rate, fluid viscosity and reservoir permeability. The higher the water injection rate, the larger the maximum seepage resistance needs to be conquered; the higher the oil viscosity, the larger the maximum seepage resistance needs to be conquered; the lower the reservoir permeability, the larger the maximum seepage resistance needs to be conquered.

Key words: low permeability reservoirs; displacement pressure gradient; nonlinear feature of seepage resistance gradient; maximum seepage resistance gradient; change rate of seepage resistance gradient

收稿日期:2017-09-15。

作者简介:苏海波(1981—),男,黑龙江肇东人,副研究员,硕士,从事低渗透油藏渗流机理及油藏数值模拟技术等方面的研究。联系电话:13561090603, E-mail:suhaibo.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地济阳坳陷致密油开发示范工程”(2017ZX05072)。

低渗透储层注水开发是提高采收率的重要方法之一,驱替过程中渗流阻力较大,“注不进、采不出”问题严重。前人开展了低渗透储层渗流机理的研究^[1-2],关注了低渗透储层水驱注采压差的变化对开发效果的影响^[3-6]。低渗透储层具有比中、高渗透储层更细、更小的孔喉,固体与液体界面间作用力显著,油水两相渗流过程中边界层效应^[7]、启动压力梯度^[8]及贾敏效应综合作用引起的附加渗流阻力大,使低渗透储层油水两相流体在流动过程中的渗流阻力比单相流体大^[9]。

目前,有学者基于物理实验分析了边界层变化特征及对渗流规律的影响^[10];启动压力梯度引起的附加渗流阻力梯度的变化特征相对较为成熟^[11];低渗透储层的贾敏效应使大量的油滴被捕集成为残余油,同时锁死已形成的渗流通道,致使水驱油过程存在较大渗流阻力^[12]。但低渗透储层油水两相渗流过程中的水驱油渗流阻力梯度变化特征还没有相关研究。为此,笔者在低渗透储层水驱油过程质量守恒定律的基础上,提出了低渗透储层油水两相渗流过程中的水驱油渗流阻力梯度宏观表征方法,研究渗流阻力梯度变化特征,以期低渗透储层注水开发提供理论指导。

1 水驱油渗流阻力梯度数学模型

根据边界层理论,由于固体与液体界面间强烈的物理、化学作用,在油藏岩石内表面存在1个原油边界层。边界流体的组成和性质与体相原油的差别很大,存在组分的有序变化及结构粘度特征、屈服值。边界流体必须克服固体与液体界面间的分子作用力才能参与流动^[13-14]。由于边界层的影响,实际参与渗流的有效孔喉半径减小,并且边界层的厚度随着驱替压力梯度的增大而减小^[9,14]。因此,流体在低渗透储层中渗流时表现为非线性特征,低渗透储层油水两相渗流数学模型^[15]分别为

$$v_o = -10^{-6} \frac{K_o K_{rw}}{\mu_o} (1 - \delta_o e^{-c|\nabla p|})^4 \nabla p \quad (1)$$

$$v_w = -10^{-6} \frac{K_o K_{rw}}{\mu_w} (1 - \delta_o e^{-c|\nabla p|})^4 \nabla p \quad (2)$$

在不考虑岩石及流体压缩的条件下,根据质量守恒定律在任一过流断面上油、水总流量与注入速率满足的关系式为

$$\begin{aligned} q_{inj} + 10^{-6} A \frac{K_o K_{rw}}{\mu_w} (1 - \delta_o e^{-c|\nabla p|})^4 \nabla p + \\ 10^{-6} A \frac{K_o K_{rw}}{\mu_o} (1 - \delta_o e^{-c|\nabla p|})^4 \nabla p = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可以得到,低渗透储层水驱油过程的渗流阻力梯度可表示为

$$\psi = 10^6 \frac{q_{inj}}{AK_o} \times \frac{\mu_w}{(1 - \delta_o e^{-c|\nabla p|})^4} \times \frac{f_w}{K_{rw}} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,低渗透储层中水驱油流动过程中渗流阻力梯度变化特征的主要影响因素为油水两相的流体粘度、储层渗透率和注入速率。低渗透储层的含水率和水相相对渗透率是含水饱和度的函数。因此,在低渗透储层的性质及流体性质一定的条件下,低渗透储层水驱油渗流阻力梯度可由含水饱和度来表达。

低渗透储层中渗流阻力梯度的变化特征应用渗流阻力梯度的变化率表征,定义为地层中某位置处,在某一瞬时渗流阻力梯度的变化量与含水饱和度的变化量之比,其表达式为

$$\xi = \frac{\partial \psi}{\partial S_w} \quad (5)$$

根据水驱油渗流阻力梯度的定义及式(5),通过式(4)对含水饱和度取偏导数,得任意渗流截面上的油水两相渗流阻力梯度变化率,其表达式为

$$\xi = a[-f(S_w) + g(S_w)] \quad (6)$$

其中

$$a = 10^6 \frac{q_{inj}}{AK_o} \times \frac{\mu_w}{(1 - \delta_o e^{-c|\nabla p|})^4} \quad (7)$$

$$f(S_w) = \frac{f_w}{K_{rw}} \times \frac{\partial K_{rw}}{\partial S_w} \quad (8)$$

$$g(S_w) = \frac{\partial f_w}{\partial S_w} \quad (9)$$

分析式(6)可知,当 $\xi = 0$ 时,由式(4)确定的低渗透储层水驱油的渗流阻力梯度最大。

2 水驱油渗流阻力梯度的非线性特征

对于一维的低渗透岩心模型,给定其初始含水饱和度为0.8,束缚水饱和度为0.2。从入口端以恒定的注入速率注入,岩石和流体属性参数包括:渗流截面积为1.0 m²,渗透率为1.0 mD,水相粘度为1.0 mPa·s,油相粘度为3.0 mPa·s,非线性渗流系数为0.5 m/MPa,体积注入速率为1.0×10⁻⁶ m³/s,静态边界层厚度为0.4。用于计算的油水相对渗透率曲线如图1所示。

根据式(6)绘制出低渗透储层水驱油过程中渗流阻力梯度变化率(图2)。由图2可以看出,低渗透

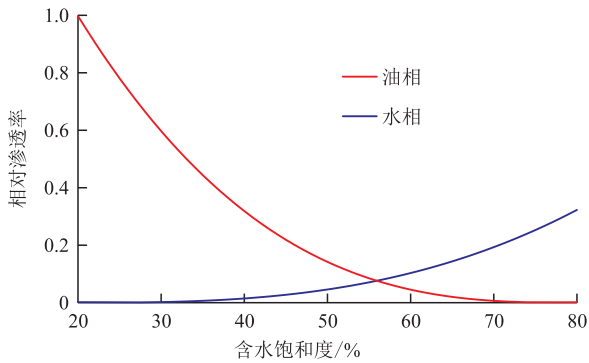


图1 油水相对渗透率曲线

Fig.1 Oil-water relative permeability curve

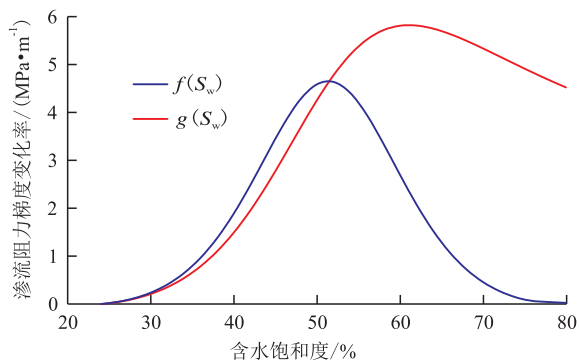


图2 低渗透储层水驱油过程中渗流阻力梯度变化率

Fig.2 Change rate of seepage resistance gradient during water flooding in low permeability reservoir

储层水驱油过程的基本特征是油水两相渗流过程中渗流阻力梯度呈非线性特征,随着含水饱和度的增加($\xi > 0$),渗流阻力梯度先增加后减小($\xi < 0$);当流体粘度、储层渗透率和注入速率一定,渗流阻力梯度的变化率为0时,水驱油渗流阻力梯度为最大。水驱油渗流阻力梯度最大的物理意义为:①低渗透储层水驱开发过程中,进一步降低含油饱和度、提高水驱效率的前提条件是驱替压力梯度不小于最大渗流阻力梯度。②当驱替压力梯度大于最大渗流阻力梯度后,储层中的流动将以水相流动为主,水驱油过程的渗流阻力降低。③低渗透储层水驱油过程是含水饱和度不断变化的过程,在一定注入压力下注水过程逐渐停止,只有当驱替压力梯度大于最大渗流阻力梯度时,注水过程才能顺利完成;而采出端必须建立足够的驱动压差才能提高驱油效率。

注入速率的影响 根据式(4),将不同注入速率水驱油过程的渗流阻力梯度和含水饱和度作对比(图3)。由对比结果可知:在注入速率一定的条件下,驱替压力梯度小于最大渗流阻力梯度时,随含水饱和度逐渐增加,注水过程将逐渐停止,只有进一步提高驱替压力梯度,使驱替压力梯度大于最大渗流阻力梯度,注水过程才会完成,这就是低渗

透储层注不进的主要原因;而对于采出端,水驱油过程同样是一个含水饱和度逐渐增加的过程,渗流阻力逐渐增加,这就是采不出的主要原因。

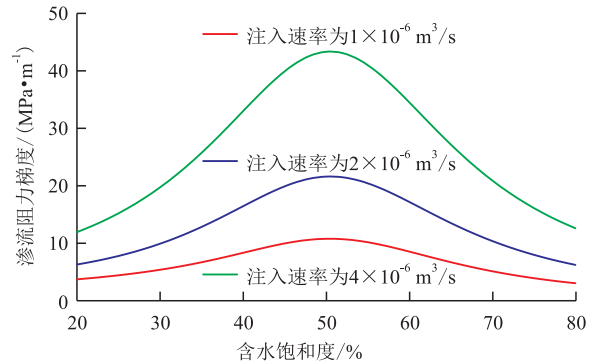


图3 注入速率对渗流阻力梯度分布的影响

Fig.3 Effect of injection rate on seepage resistance gradient distribution

由图3可知:对于给定的低渗透储层,注入速率越大,渗流阻力梯度变化的幅度越大,水驱油的最大渗流阻力梯度越大;由式(4)可知,注入速率并不能够改变最大渗流阻力梯度对应的含水饱和度,主要与储层和流体性质相关,而与注入条件无关。

油相粘度的影响 从不同含水饱和度下油相粘度对渗流阻力梯度分布的影响(图4)可以看出:油相粘度一定时,渗流阻力梯度随含水饱和度的增加先增加后降低;在低含水饱和度条件下,油相粘度越大,水驱油渗流阻力越大,最大渗流阻力梯度越大,出现最大渗流阻力梯度的含水饱和度越小;在高含水饱和度条件下,油相粘度对渗流阻力梯度分布的影响逐渐减小。

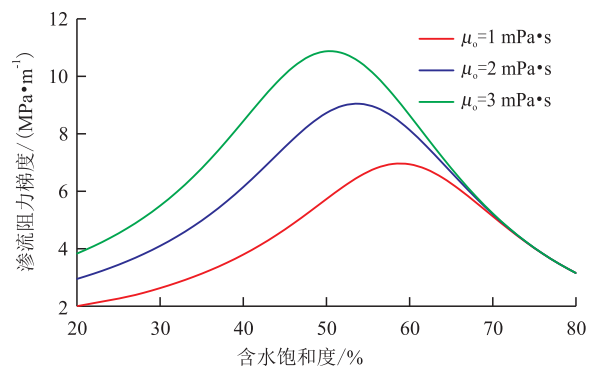


图4 油相粘度对渗流阻力梯度分布的影响

Fig.4 Seepage resistance gradient distributions for different oil viscosity

储层渗透率的影响 从储层渗透率对渗流阻力梯度分布的影响(图5)可知:储层渗透率一定时,随含水饱和度的增加,渗流阻力梯度先增加后降低;渗透率越大,水驱油渗流阻力梯度越小,最大渗流阻力梯度越小;储层渗透率越大,最大渗流阻力梯度对应的含水饱和度越小。

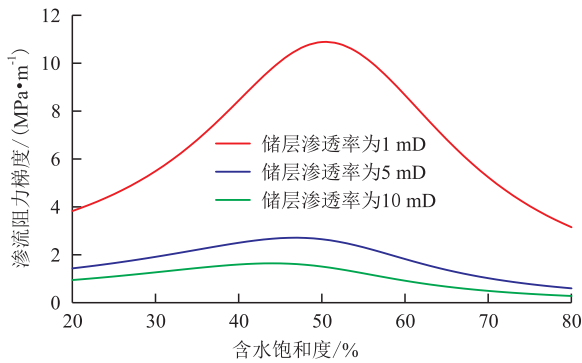


图5 储层渗透率对渗流阻力梯度分布的影响
Fig.5 Effect of reservoir permeability on seepage resistance gradient distribution

3 实例分析

低渗透储层水驱开发过程中,研究渗流阻力的变化特征对于提高低渗透储层水驱油效率尤为重要。当驱替压力梯度大于最大渗流阻力梯度时,储层能够建立有效的驱替压力系统,并进一步提高水驱采收率。

为验证低渗透储层水驱油渗流阻力梯度数学模型的准确性,采用胜利油区某油藏岩心及流体进行定注入速率条件下的水驱油实验,实验基本参数包括:岩心渗透率为31.9 mD,注入水粘度为0.57 mPa·s,模拟油粘度为6.63 mPa·s,岩心长度为7 cm,岩心直径为5 cm,注入速率为 8.3×10^{-9} m³/s。实验中岩心油水相对渗透率及驱替压力梯度数据见表1。根据式(4)理论计算的渗流阻力梯度与实测渗流阻力梯度的对比(图6)可知:用数学模型计算的理论水驱油渗流阻力梯度与实测结果吻合程度较高,即随着含水饱和度的增加,水驱油渗流阻力梯度逐渐增加至最大渗流阻力梯度,并且含水饱和度再增

表1 岩心油水相对渗透率及驱替压力梯度
Table1 Data of oil-water relative permeability and displacement pressure gradient

含水饱和度	油相相对渗透率	水相相对渗透率	驱替压力梯度/(MPa·m ⁻¹)
0.394	1.000	0	8.037
0.519	0.136	0.047	11.748
0.557	0.062	0.086	7.547
0.589	0.033	0.125	5.391
0.611	0.022	0.160	4.257
0.635	0.014	0.203	3.375
0.662	0.009	0.264	2.603
0.685	0.006	0.325	2.117
0.704	0.005	0.385	1.788
0.719	0.000	0.441	1.563

加,水驱油渗流阻力梯度逐渐减小。在实验岩心及流体参数条件下,水驱油过程中的最大渗流阻力梯度为14.6 MPa/m,达到最大渗流阻力梯度时的含水饱和度为49.4%。

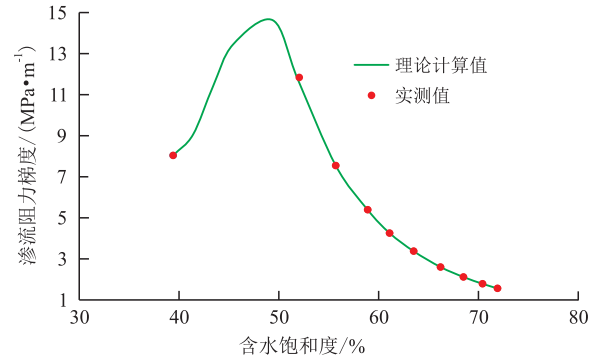


图6 理论计算的渗流阻力梯度与实测渗流阻力梯度的对比

Fig.6 Contrast of seepage resistance gradient between calculated value and experimental result

4 结论

低渗透储层油水两相的渗流阻力梯度是含水饱和度的函数,与油相粘度、储层渗透率、注入速率相关。水驱油渗流阻力梯度呈非线性特征,随含水饱和度的增加,渗流阻力梯度先增加后减小。低渗透储层水驱油过程中存在最大的渗流阻力梯度;在储层渗透率和注入速率相同的条件下,油相粘度越大,最大渗流阻力梯度越大;在油相粘度和注入速率相同的条件下,储层渗透率越低,最大渗流阻力梯度越大;在储层渗透率和油相粘度相同的条件下,注入速率越高,最大渗流阻力梯度越大。

针对低渗透储层渗流阻力梯度的分析方法仅适用于单相流,提出了适用于低渗透储层水驱油渗流阻力梯度变化特征的特征方法,理论计算结果与实测结果吻合程度较高,准确地表征了渗流阻力梯度的变化特征。

低渗透储层水驱油过程是含水饱和度不断变化的过程,提高水驱效率前提条件是驱替压力梯度不小于最大渗流阻力梯度。研究结果对于分析低渗透油藏水驱油过程中的注水压力变化和提水驱效率提供了理论指导。

符号解释:

v_o ——油相渗流速度, m/s; K_o ——绝对渗透率, mD; K_w ——油相相对渗透率; μ_o ——油相粘度, mPa·s; δ_o ——静态边界层厚度; c ——流体非线性渗流系数, m/MPa; ∇p ——驱替压力梯度, MPa/m; v_w ——水相渗流速度, m/s;

K_w ——水相相对渗透率; μ_w ——水相粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; q_{inj} ——水相的体积注入速率, m^3/s ; A ——储层的过流面积, m^2 ; ψ ——渗流阻力梯度, MPa/m ; f_w ——含水率; ξ ——低渗透储层水驱油渗流阻力梯度变化率, MPa/m ; S_w ——含水饱和度。

参考文献:

- [1] 束青林, 郭迎春, 孙志刚, 等. 特低渗透油藏渗流机理研究及应用[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(5): 58-64.
SHU Qinglin, GUO Yingchun, SUN Zhigang, et al. Research and application of percolation mechanism in extra-low permeability oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 58-64.
- [2] 计秉玉, 赵宇, 宋考平, 等. 低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 129-133.
JI Bingyu, ZHAO Yu, SONG Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.
- [3] 崔传智, 安然, 李凯凯, 等. 低渗透油藏水驱注采压差优化研究[J]. 特种油气藏, 2016, 23(3): 83-85.
CUI Chuazhi, AN Ran, LI Kaikai, et al. Waterflooding injection-production pressure difference optimization in low-permeability reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 83-85.
- [4] 苗志国. 有效驱动系数对低和特低渗透储层开发效果的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(2): 43-47.
MIAO Zhiguo. Influences of the effective driving coefficient on the development effects of low and ultra-low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 43-47.
- [5] 张晓亮, 杨仁锋, 李娜. 考虑启动压力梯度的弹性采收率计算方法及影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(2): 72-77, 87.
ZHANG Xiaoliang, YANG Renfeng, LI Na. Computing method and influencing factors of natural depletion oil recovery in consideration of threshold pressure gradient [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 72-77, 87.
- [6] 沈鹏飞, 金萍, 范晓东, 等. 致密储层采出程度影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(1): 165-169.
SHEN Pengfei, JIN Ping, FAN Xiaodong, et al. Influencing factors on the produced degree of the tight reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 165-169.
- [7] 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. Percolating flow mechanism of low permeability reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [8] 王瑞飞. 特低渗透砂岩油藏储层微观特征——以鄂尔多斯盆地延长组为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
WANG Ruifei. Microscopic characteristics of reservoir in ultra-low permeability sand reservoir—Taking Yangchang Formation in Ordos Basin as an example [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [9] 徐绍良, 岳湘安. 低速非线性流动特性的实验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(5): 60-63.
XU Shaoliang, YUE Xiangan. Experimental research on nonlinear flow characteristics at low velocity [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2007, 31(5): 60-63.
- [10] 刘辉, 冯明生, 何顺利, 等. 特低渗透油藏渗流阻力梯度的非线性特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(6): 82-85.
LIU Hui, FENG Mingsheng, HE Shunli, et al. Nonlinear feature of flow resistance gradient in ultra-low permeability reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(6): 82-85.
- [11] 李劲峰, 曲志浩, 孔令荣. 贾敏效应对低渗透油层有不可忽视的影响[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(2): 93-94.
LI Jinfeng, QU Zhihao, KONG Lingrong. The obvious influence of Jamin effect on low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(2): 93-94.
- [12] 邓英尔, 阎庆来, 马宝岐. 界面分子力作用与渗透率的关系及其对渗流的影响[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(2): 46-48.
DENG Ying'er, YAN Qinglai, MA Baoqi. Relationship between interfacial molecular interaction and permeability and its influence on fluid flow [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(2): 46-48.
- [13] 李中锋, 何顺利. 低渗透储层原油边界层对渗流规律的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(2): 57-59.
LI Zhongfeng, HE Shunli. Influence of boundary layers upon filtration law in low-permeability oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(2): 57-59.
- [14] 徐绍良, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. 边界层流体对低渗透油藏渗流特性的影响[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2): 26-28.
XU Shaoliang, YUE Xiangan, HOU Jirui, et al. Influence of boundary-layer fluid on the seepage characteristic of low permeability reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(2): 26-28.
- [15] 苏海波. 反映动态启动压力梯度的低渗透油藏渗流模型[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(6): 105-111.
SU Haibo. A flow model reflecting dynamic kick-off pressure gradient for low permeability reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 37(6): 105-111.