

文章编号:1009-9603(2021)05-0094-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.05.011

基于流动实验和动态阻力特征的 致密油藏非线性渗流表征

曲全工

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:针对致密油藏,在流动实验和理论分析的基础上,建立了致密油藏非线性渗流表征新方法,该方法基于致密油藏渗流过程中的动态阻力梯度特征,结合储层岩心流动实验,获得启动压力梯度、拟启动压力梯度和液测渗透率等3个表征参数,从而建立新的致密油藏非线性渗流表征模型——动态阻力梯度模型,并通过单井尺度进行了验证。研究表明:随着驱替压力的增加,动态阻力梯度逐渐增加且与驱替压力梯度的对数呈线性关系;非线性渗流数学表征与启动压力梯度、拟启动压力梯度和液测渗透率3个参数相关,并以这3个参数为基础建立了基于流动实验的致密油藏非线性渗流表征。从油藏应用的角度表明该非线性渗流表征模型的精度要高于达西模型和拟启动压力梯度模型。

关键词:非线性渗流;流动实验;动态阻力梯度;启动压力梯度;致密油藏

中图分类号:TE312

文献标识码:A

Characterization of nonlinear percolation in tight oil reservoirs based on flow experiments and dynamic resistance characteristics

QU Quangong

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC,
Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: For tight oil reservoirs, based on flow experiments and theoretical analysis, a new method for characterizing nonlinear percolation in tight oil reservoirs percolation was developed. Based on the characteristics of dynamic resistance gradient in the percolation process of tight oil reservoirs percolation, this method adopted the flow experiment with reservoir cores to obtain three characterization parameters including starting pressure gradient, pseudo-starting pressure gradient, and measured liquid permeability. Thus, a new characterization model of nonlinear percolation in tight oil reservoirs percolation, i.e., dynamic resistance gradient model, was built and verified on a single-well scale. The research results show that with the increase in displacement pressure, the dynamic resistance gradient gradually increases and is linearly correlated to the logarithm of the displacement pressure gradient. The mathematical characterization of nonlinear percolation is related to three parameters, namely starting pressure gradient, pseudo-starting pressure gradient, and measured liquid permeability. According to the three parameters, the characterization of nonlinear percolation in tight oil reservoirs was established based on flow experiments. From the perspective of reservoir application, the proposed characterization model is more accurate than the Darcy model and the pseudo-starting pressure gradient model.

Key words: nonlinear percolation; flow experiment; dynamic resistance gradient; starting pressure gradient; tight oil reservoirs

致密油藏孔喉半径小、非均质性严重^[1-3],在实际开发过程中渗流速度低,属于微尺度渗流,其流

收稿日期:2021-04-15。

作者简介:曲全工(1975—),男,山东龙口人,高级工程师,博士,从事油气田开发研究。E-mail:ququangong.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)。

动过程主要受非线性渗流控制,因此实现对致密油藏非线性渗流的精确表征,对于致密油藏的开发具有重要意义^[4-5]。目前,针对致密油藏非线性渗流进行表征的模型主要包括:拟启动压力梯度模型^[6-8]、分段模型^[9-10]和基于等径毛细管束模型或者分形模型建立的非线性模型^[11-12]。其中,拟启动压力梯度模型造成驱替压力梯度小于拟启动压力梯度的区域无法流动,夸大了低渗透率储层的渗流阻力;分段模型将渗流过程分为2段,无法对整个渗流过程进行连续性表征;基于等径毛细管束模型建立的非线性模型解决了连续性表征的问题,但未考虑储层内部微观非均质性,对非线性渗流过程表征不够精确。因此,笔者在致密油藏岩心的基础上进行流动实验,建立驱替压力梯度与流体流量之间的关系,获得启动压力梯度、拟启动压力梯度和液测渗透率3个表征参数,结合描述的动态阻力梯度特征,建立基于岩心流动实验和动态阻力特征的致密油藏非线性渗流表征模型,该模型在理论分析和岩心流动实验的基础上,既反映致密油藏内部微观非均质性又能在宏观尺度应用,为致密油藏的开发提供更加精确的非线性流动数学模型。

1 动态阻力梯度特征

动态阻力是指在渗流过程中,除了流体黏滯力外还需克服的阻力,是致密油藏非线性渗流的根本原因,是一个动态参数,动态阻力梯度为动态阻力形成的梯度力^[13]。基于文献[13],建立了动态阻力非线性渗流数学表达式。

其单根毛细管建立的数学模型表达式为:

$$q_i = \frac{\pi(r-h)^4}{8\mu L} \Delta p - \frac{\pi(r-h)^2 \left[\ln(r-h) - \frac{1}{2} \right]}{\mu} \varepsilon - \frac{2\pi(r-h)^3}{3\mu} \tau_0 \quad (1)$$

对每根毛细管的流量进行表征,建立不等径毛细管束模型流量的计算方程式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (2)$$

单根毛细管模型的动态阻力梯度表达式为:

$$d_i = \frac{8 \left| \ln(r-h) - \frac{1}{2} \right|}{(r-h)^2} \varepsilon + \frac{16}{3(r-h)} \tau_0 \quad (3)$$

对每根毛细管的动态阻力梯度进行表征,建立

不等径毛细管束模型的动态阻力梯度数学模型。不等径毛细管束模型中的动态阻力梯度是按毛细管所占体积进行加权平均而获取,其计算方程式为:

$$D = \frac{\sum_i D_i \pi r_i^2}{\sum_i \pi r_i^2} \quad \begin{cases} \text{当 } q_i < 0 \text{ 时, } D_i = 0 \\ \text{当 } q_i \geq 0 \text{ 时, } D_i = d_i \end{cases} \quad (4)$$

从图1可以看出,随着驱替压力梯度的增加,动态阻力梯度与驱替压力梯度比值先增大后减小。随着驱替压力梯度的增加,动态阻力梯度曲线先从一个比较高的初始值瞬间降落,然后逐渐增大,这是由于随着驱替压力梯度的增加,孔隙中参与流动的流体越来越多,发生界面效应的区域越来越多,其阻力之和逐渐增大。

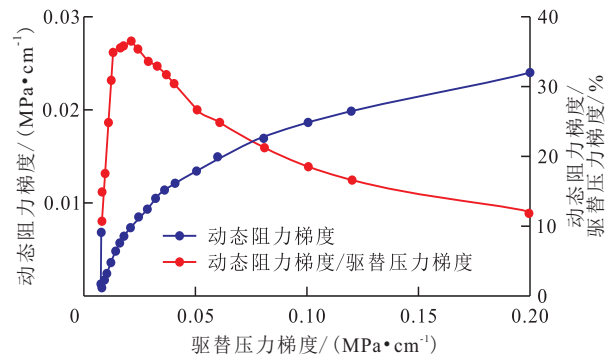


图1 动态阻力梯度特征

Fig.1 Characteristics of dynamic resistance gradient

对图1中的驱替压力梯度取对数,可以得到动态阻力梯度的半对数坐标(图2)。从图2可以看出,动态阻力梯度与驱替压力梯度的对数呈较好的线性关系,说明可以用线性关系来表征动态阻力梯度与驱替压力梯度对数值之间的关系。

致密油藏非线性渗流过程中动态阻力梯度的定量表征方程式为:

$$D = a \ln \left| \frac{dp_L}{dx} \right| + b \quad (5)$$

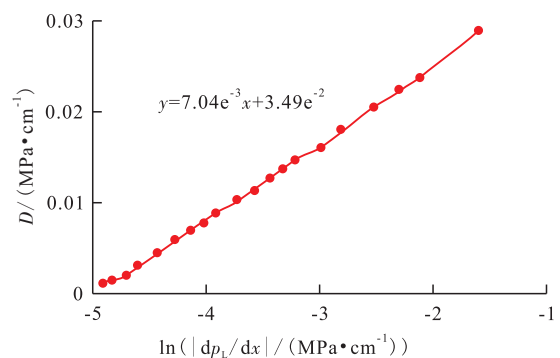


图2 动态阻力梯度与驱替压力梯度的对数关系

Fig.2 Relationship between dynamic resistance gradient and logarithm of displacement pressure gradient

2 非线性渗流数学表征方法

通过对不等径毛细管束模型的计算,明确了致密油藏渗流过程中的动态阻力梯度与驱替压力梯度的对数呈较好的线性关系,将(5)式代入达西公式可获得表征致密油藏非线性渗流的方程式为:

$$Q = -\frac{K}{\mu} A \frac{dp}{dx} = \frac{K}{\mu} A \left(\left| \frac{dp_L}{dx} \right| - D \right) \quad (6)$$

要实现非线性渗流方程的表征,其关键要获得参数 D 。而参数 D 的取得有2种方法:①延续前面的方法,考虑各种界面效应的影响,分别建立与参数 a 和 b 的关系。其优势在于可以直观且明确体现出各影响因素对参数 a 和 b 的影响,但主要缺点一是决定各种效应的系数较难以获得,二是所建立的不等径毛细管束模型虽考虑了储层内部的非均质性,但相对于储层岩心而言,仍过于理想化,与实际储层偏差大。②基于储层岩心流动实验,将参数 a 和 b 作为各种影响因素综合作用的结果进行处理。其优势在于可操作性和适应性较强,但缺点是参数 a 和 b 变成一个宏观的平均化的综合参数,无法直接明确与各影响因素间的相互关系。

研究分析,求取参数 D 采用第2种方法,但致密油藏在实际渗流过程中动态阻力梯度特征是否与驱替压力梯度的对数呈线性关系。图2中的特征是基于不等径毛细管束模型,考虑边界层效应、体相流体与边界流体界面效应、非牛顿流体效应的基础上获得的,而储层渗流时在以上各种界面效应的基础上,还存在束缚水饱和度、迂曲度、孔喉分布等各种影响因素,但各种影响因素在某一确定的储层中,其对渗流的影响作用基本固定,所以储层渗流时束缚水饱和度、迂曲度、孔喉分布等各种影响因素的存在,只是将特征线进行了上下左右的平移,改变了特征直线中的 a 与 b 的值,但动态阻力梯度特征仍然符合图2中的规律。

基于致密油藏岩心流动实验,在不同的驱替压力梯度下可以获得渗流速度,建立驱替压力梯度与渗流速度的关系(图3),图3中存在启动压力梯度和拟启动压力梯度2个关键点,启动压力梯度是在启动压力梯度测试实验中,通过驱替压力梯度与渗流速度实验曲线在渗流速度为0时对应 x 轴的压力梯度;拟启动压力梯度是通过驱替压力梯度与渗流速度实验曲线的直线延伸段与渗流速度为0时对应 x 轴的压力梯度。

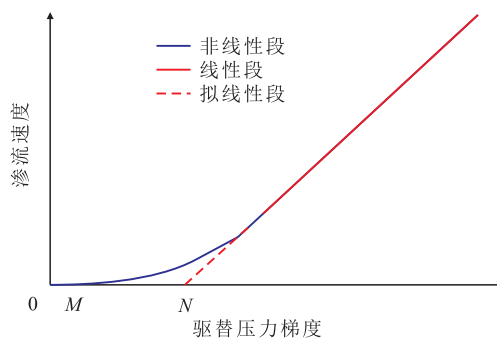


图3 致密油藏驱替压力梯度与渗流速度的关系

Fig.3 Relationship between displacement pressure gradient and percolation velocity in tight oil reservoirs

将 M 点处的流量和驱替压力梯度代入(6)式中,在 M 点, $Q_{\lambda_M} = 0, \lambda_M = \frac{\Delta p}{L}$,获得方程式为:

$$\frac{K}{\mu} A (\lambda_M - D) = 0 \quad (7)$$

将(7)式与(5)式联立可得:

$$\frac{K}{\mu} A [\lambda_M - (a \ln \lambda_M + b)] = 0 \quad (8)$$

将 N 点处的流量和驱替压力梯度代入(6)式中,在 N 点, $Q = Q_{\lambda_N}, \lambda_N = \frac{\Delta p}{L}$,获得方程式为:

$$Q_{\lambda_N} = \frac{K}{\mu} A (\lambda_N - D) \quad (9)$$

将(9)式与(5)式联立可得:

$$Q_{\lambda_N} = \frac{K}{\mu} A [\lambda_N - (a \ln \lambda_N + b)] \quad (10)$$

联立(8)式和(10)式便可求得参数 a 和 b 的表达式分别为:

$$a = \frac{\lambda_N - \lambda_M - \frac{Q_{\lambda_N} \mu}{KA}}{\ln \lambda_N - \ln \lambda_M} \quad (11)$$

$$b = \lambda_M - a \ln \lambda_M \quad (12)$$

将获得的参数 a 和 b 代入(6)式中,可获得非线性渗流表征方程式为:

$$Q = \frac{K}{\mu} A \left[\left| \frac{dp_L}{dx} \right| - \left(\frac{\lambda_N - \lambda_M - \frac{Q_{\lambda_N} \mu}{KA}}{\ln \lambda_N - \ln \lambda_M} \times \ln \left| \frac{dp_L}{dx} \right| + \lambda_M - \frac{\lambda_N - \lambda_M - \frac{Q_{\lambda_N} \mu}{KA}}{\ln \lambda_N - \ln \lambda_M} \times \ln \lambda_M \right) \right] \quad (13)$$

(13)式是基于动态阻力梯度特征以及流动实验建立的致密油藏非线性渗流表征的方程式。若实现非线性渗流方程式(13)的准确表征,需要得到

$K, \mu, A, \lambda_M, \lambda_N$ 和 Q_{λ_N} 等参数,其中 μ 通过储层流体资料获得,而其他参数可通过储层岩心流动实验获得,这样就可以将由理论建立的非线性渗流模型转变为基于岩心流动实验的非线性渗流模型。

3 参数确定与方法验证

3.1 参数确定

实验设备及流程 实验设备主要包括:高精度柱塞泵、水容器、油容器、岩心夹持器、围压跟踪泵、计量装置和恒温箱(图4),其中最关键的为高精度柱塞泵,要能够保证有足够小的流速,本实验中采用的为Quizix泵,其流量精度为 1.0×10^{-4} mL/min。

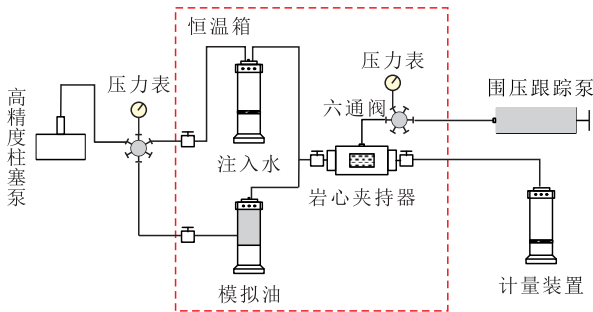


图4 岩心流动实验流程

Fig.4 Flow experiment with cores

实验流体及温度 实验用水为3%的KCL溶液。实验用油为储层脱水脱气原油与中性煤油配制成的模拟地层油。实验温度为70℃。

实验步骤 实验步骤主要包括:①将密闭取心井岩心洗油洗盐处理后进行岩心基础数据测量,获得岩心长度、直径、空气渗透率,之后岩心饱和和实验用水,并测量岩心孔隙度。②连接实验流程,将恒温箱温度设置到70℃,恒温4h后,将岩心用实验用油驱替至束缚水状态,测量束缚水饱和度。③达到束缚水状态后,设置围压跟踪泵使净围压一直保持为3MPa,以消除压敏效应对渗透率的影响,设置高精度柱塞泵流量至0.0002 mL/min,连续驱替至稳定状态后测量压力。④将流速设置为低速渗流和高速渗流两部分,逐渐提高流量,记录每个流量下达到稳定状态下的压力,绘制驱替压力梯度与流量的关系曲线。⑤将关系曲线分为非线性段和拟线性段两部分,分段进行拟合,非线性段用二项式拟合,拟线性段用线性公式拟合,分别获得 λ_M 和 λ_N 。⑥将高精度柱塞泵调至恒压模式,设置驱替压力为 $\lambda_N L$,连续驱替至稳定状态后获得该压力梯度下的流量 Q_{λ_N} 。⑦将高精度柱塞泵压力设置为34.5MPa(作为驱替实验的最大驱替压力),当流量稳定后测得

Q_{\max} ,根据达西公式获得岩心液测渗透率。

流动实验采用的致密油藏岩心长度为4.956cm,直径为2.504cm,岩心渗透率为1.85mD,孔隙度为17.2%。用实验用水将岩心驱替至束缚水状态下,获得岩心束缚水饱和度为42.8%,实验温度为70℃,在该温度下采用的实验用油黏度为1.324mPa·s。

将实验过程中测量获得的流量和驱替压力,分别绘制低速渗流和高速渗流部分的流量与驱替压力梯度关系曲线,并对该关系曲线进行分段拟合。根据启动压力梯度实验的拟合方法,对其中的低速渗流段采用二项式拟合,高速渗流段采用线性公式拟合(图5)。

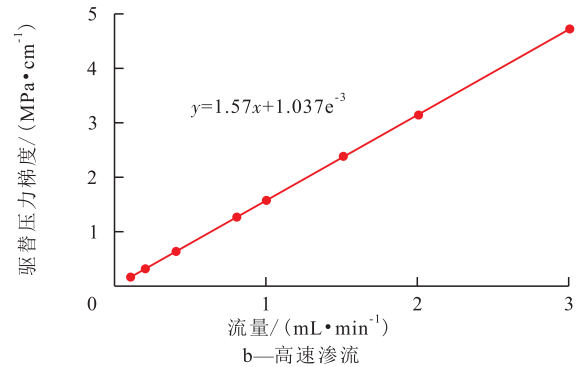
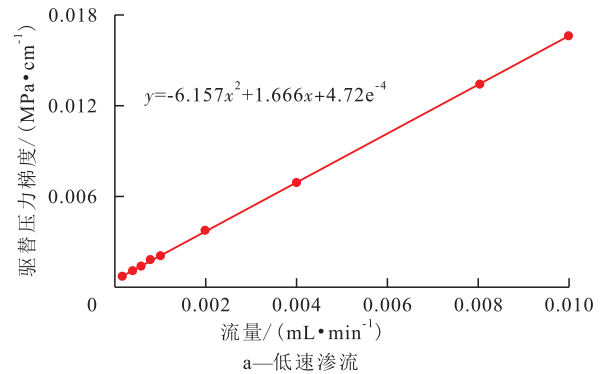


图5 低、高速渗流驱替压力梯度与流量关系

Fig.5 Relationship between displacement pressure gradient and flow rate under low- and high-velocity percolation

根据拟合公式,获得致密油藏渗流的启动压力梯度为 1.751×10^{-3} MPa/cm,拟启动压力梯度为 3.770×10^{-3} MPa/cm。根据实验步骤⑥将高精度柱塞泵驱替压力设置为 9.440×10^{-3} MPa,可以获得拟启动压力梯度对应下流量为 1.15×10^{-3} mL/min。根据实验步骤⑦将高精度柱塞泵驱替压力设置为34.5MPa,获得对应下的流量为4.4408 mL/min,根据达西公式可得 K_{\max} 为0.286mD。将以上参数代入(11)和(12)式中,便可得到参数a和b分别为 1.081×10^{-4} 和 1.299×10^{-3} ,将其代入(6)式中,获得致密油藏非线性渗流表征方程式为:

$$Q = \frac{K}{\mu} A \times \left[\left| \frac{dp_L}{dx} \right| - \left(1.081 \times 10^{-4} \ln \left| \frac{dp_L}{dx} \right| + 1.299 \times 10^{-3} \right) \right] \quad (14)$$

3.2 方法验证

对(14)式进行验证。通过岩心渗流实验测试获得的流量与驱替压力梯度,对比非线性渗流表征方程计算结果,分别对低、高速渗流的非线性渗流方程进行验证(图6)。从验证结果可以看出,计算结果与实验结果符合程度较高,说明该非线性渗流表征方程在描述致密油藏渗流时精度高。

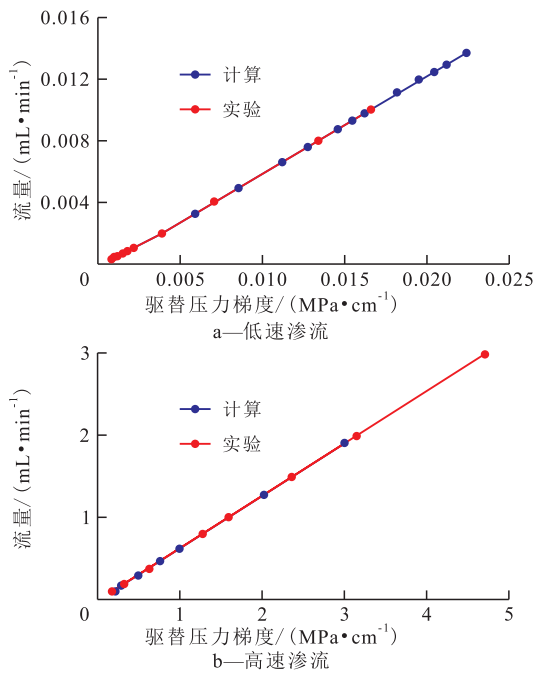


图6 低、高速渗流时计算结果与实验结果对比

Fig.6 Comparison between calculated and experimental results under low- and high-velocity percolation

3.3 实例对比

以胜利油区某区块为例,该区块平均液测渗透率为0.286 mD,原油黏度为1.324 mPa·s,原始地层压力为45.0 MPa,厚度为10 m。岩心流动实验测得的启动压力梯度为 1.751×10^{-3} MPa/cm,拟启动压力梯度为 3.770×10^{-3} MPa/cm。对比达西模型、动态阻力梯度模型和拟启动压力梯度模型,其运动方程式分别为:

$$v_{DC} = \frac{K}{\mu} \left| \frac{dp}{dx} \right| \quad \text{达西模型} \quad (15)$$

$$v_D = \frac{K}{\mu} \left(\left| \frac{dp}{dx} \right| - D \right) \quad \text{动态阻力梯度模型} \quad (16)$$

$$v_{ND} = \frac{K}{\mu} \left(\left| \frac{dp}{dx} \right| - \lambda_N \right) \quad \text{拟启动压力梯度模型} \quad (17)$$

从达西模型、动态阻力梯度模型和拟启动压力梯度模型的对比(图7)可以看出:达西模型和拟启动压力梯度模型的压差和产量呈线性关系,无法准确表征致密油藏渗流过程中的非线性特征;动态阻力梯度模型在低生产压差下,其压差与产量呈非线性关系,能较好地非线性渗流进行表征,特别是在渗流压差较小时更明显。因此,所建立的动态阻力梯度模型相对于达西模型和拟启动压力梯度模型,可以更准确地对低渗透储层进行产能计算。

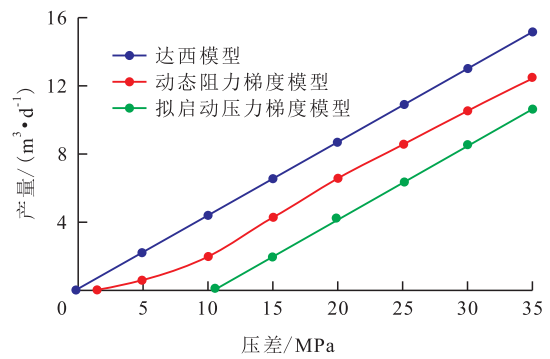


图7 3种不同渗流模型的产量对比

Fig.7 Comparison of productivity for three different percolation models

4 结论

针对致密油藏非线性渗流问题,基于致密油藏渗流过程中的动态阻力梯度特征,结合储层岩心流动实验,根据启动压力梯度、拟启动压力梯度、液测渗透率3个关键参数,建立新的致密油藏非线性渗流表征模型——动态阻力梯度模型。相对于达西模型和拟启动压力梯度模型,能够对非线性渗流段更好地表征,同时相对于其他非线性渗流表征模型,表征参数可以根据流动实验获得,更具有可操作性;并且根据此动态阻力梯度模型,可以进一步研究非线性渗流对致密油藏油水两相渗流的影响。

符号解释

- a, b ——描述线性特征的斜率和截距,与储层性质、流体性质、储层与流体的界面效应有关;
- A ——渗流横截面积, cm^2 ;
- d_i ——单根毛细管模型的动态阻力梯度, MPa/cm ;
- D ——不等径毛细管束模型中的动态阻力梯度, MPa/cm ;
- D_i ——单根毛细管动态阻力梯度, MPa/cm ;
- $\frac{dp}{dx}$ ——实际渗流过程中,作用于流体渗流的梯度, MPa/cm ;

$\left| \frac{dp_L}{dx} \right|$ ——驱替压力梯度, MPa/cm;

h ——边界层厚度, m;

i ——毛细管数量标记;

K ——岩心液测渗透率, mD;

K_{\max} ——驱替压力为 34.5 MPa 下岩心液测渗透率, mD;

L ——毛细管长度, m;

n ——毛细管数量, 根;

Δp ——驱替压力, MPa;

p_L ——压力, MPa;

q_i ——毛细管流量, m/s;

Q ——不等径毛细管束模型流量, m³/s;

Q_{\max} ——驱替压力为 34.5 MPa 下岩心流量, mL/min;

Q_{λ_M} ——启动压力梯度对应的流量, mL/min;

Q_{λ_N} ——拟启动压力梯度对应的流量, mL/min;

r ——毛细管半径, m;

r_i ——单根毛细管半径, m;

v_D ——动态阻力梯度模型渗流速度, cm/min;

v_{DC} ——达西模型渗流速度, cm/min;

v_{ND} ——拟启动压力梯度模型渗流速度, cm/min;

x ——沿岩心方向长度, cm;

ε ——界面作用系数, Pa·m;

λ_M ——启动压力梯度, MPa/cm;

λ_N ——拟启动压力梯度, MPa/cm;

μ ——流体黏度, Pa·s;

τ_0 ——流体屈服应力, Pa。

参考文献

- [1] 徐运亭, 徐启, 郭永贵. 致密油藏渗流机理研究及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
XU Yunting, XU Qi, GUO Yonggui. Low permeability reservoir flow mechanism and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [2] 朱维耀, 孙玉凯, 王世虎, 等. 特致密油藏有效开发渗流理论和方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 58-65.
ZHU Weiyao, SUN Yukai, WANG Shihu, et al. Theory and approach of porous flow in ultra-low permeability reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 58-65.
- [3] 汪贺, 师永民, 徐大卫, 等. 非常规储层孔隙结构表征技术及进展[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 21-30.
WANG He, SHI Yongmin, XU Dawei, et al. Unconventional reservoir pore structure characterization techniques and progress[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 21-30.
- [4] 向洪, 王志平, 湛勇, 等. 三塘湖盆地致密油加密井体积压裂技术研究与实践[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 260-266.
XIANG Hong, WANG Zhiping, CHEN Yong, et al. Infill-well volume fracturing of tight oil reservoirs in Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 260-266.
- [5] 胡利民, 程时清, 唐蕾, 等. 超低渗透油藏菱形反九点井网合理排距[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(2): 62-68.
HU Limin, CHENG Shiqing, TANG Lei, et al. Reasonable row spacing of the diamond inverted nine-spot well pattern in ultra-low permeability oil reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(2): 62-68.
- [6] 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, 149.
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, 149.
- [7] 郝斐, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏启动压力梯度研究[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 29-32.
HAO Fei, CHENG Linsong, LI Chunlan, et al. Study on threshold pressure gradient in ultra-low permeability reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(6): 29-32.
- [8] 郭慧玲, 汤勇, 漆国权, 等. 考虑启动压力梯度的低渗气藏压裂水平井产能计算[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(4): 29-32.
GUO Huiling, TANG Yong, QI Guoquan, et al. Productivity calculation of fractured horizontal wells in low permeability gas reservoir by the consideration of threshold pressure gradients[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(4): 29-32.
- [9] 杨仁锋, 姜瑞忠, 刘世华. 低渗透油藏考虑非线性渗流的必要性论证[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 493-497.
YANG Renfeng, JIANG Ruizhong, LIU Shihua. Demonstration of essentiality of considering nonlinear flow in low permeability reservoir[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2011, 18(4): 493-497.
- [10] 唐伏平, 唐海, 余贝贝, 等. 存在启动压力梯度时的合理注采井距确定[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(4): 89-91.
TANG Fuping, TANG Hai, YU Beibei, et al. The determination of the injection-production well spacing with the consideration of the start-up pressure gradient[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(4): 89-91.
- [11] 苏海波, 于金彪, 张同伍, 等. 低渗透储层水驱油渗流阻力特征[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(1): 117-121.
SU Haibo, YU Jinbiao, ZHANG Tongwu, et al. Features of seepage resistance during water flooding in low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 117-121.
- [12] 赵久玉, 王付勇, 杨坤. 致密砂岩分形渗透率模型构建及关键分形参数计算方法[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 73-78.
ZHAO Jiuyu, WANG Fuyong, YANG Kun. Tight sandstone fractal permeability model and key fractal parameter calculation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(4): 73-78.
- [13] 孙志刚, 马炳杰, 李奋. 低渗透储层流体非线性渗流机理及特征分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2019, 41(2): 109-117.
SUN Zhigang, MA Bingjie, LI Fen. Mechanism and characteristics of nonlinear flow in porous media of low permeability reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2019, 41(2): 109-117.