

引用格式:陈元千,刘攀,雷丹凤.对启动压力梯度和压敏效应的反思、推导与评论[J].油气藏评价与开发,2021,11(1):7-13.

Chen Yuanqian, Liu Pan, Lei Danfeng. Rethink, derivation and review on the starting pressure gradient and pressure sensitivity effect[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 7-13.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.01.002

## 对启动压力梯度和压敏效应的反思、推导与评论

陈元千<sup>1</sup>,刘攀<sup>1,2</sup>,雷丹凤<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083)

**摘要:** Bear(1972)和 Fatt(1952)分别提出的启动压力梯度和压敏效应,对于低渗透油气藏的开发具有一定的实际意义。所谓启动压力梯度,是指促使油气在地层中开始流动的临界压力梯度。所谓压敏效应是指地层渗透率随地层压降而降低的现象。尽管由于致密低渗的鄂尔多斯盆地油气藏开发分析的需要,我国的有关专家学者对启动压力梯度和压敏效应关注了近二十年,但对两者的认识至今仍处在初期的感性阶段,究原因是缺少基础理论上的研究。通过推导表明,达西线性流动的压力梯度和启动压力梯度均为常数,而达西平面径向流的压力梯度和启动压力梯度则为径向半径的函数。我国的专家学者将线性流的启动压力梯度这一常数直接用于平面径向流方程是不正确的。大量的实验数据表明,渗透率的压敏效应是存在的,但绝对不可以用于达西定律的流动方程。因为“达西定律是建立在常数渗透率基础上的”,否则,就会动摇地下流体力学、油气藏工程和油藏数值模拟的理论基础。

**关键词:** 启动压力梯度;压敏效应;反思;推导;评论

中图分类号:TE348

文献标识码:A

### Rethink, derivation and review on the starting pressure gradient and pressure sensitivity effect

Chen Yuanqian<sup>1</sup>, Liu Pan<sup>1,2</sup>, Lei Danfeng<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083;

2. China University of Geosciences(Beijing), Energy College, Beijing 100083)

**Abstract:** The starting pressure gradient and pressure sensitivity effect proposed by Bear(1972) and Fatt(1952) respectively have practical significance for the development of low permeability oil and gas reservoirs. The so-called starting pressure gradient refers to the critical pressure gradient that causes the oil and gas formations to start flowing. The so-called pressure-sensitive effect includes the phenomenon that the formation permeability decreases as the formation pressure drops. Due to the theoretical needs of tight and low-permeability reservoir development analysis in the Ordos Basin, relevant experts and scholars in China have paid attention to the starting pressure gradient and pressure sensitivity effect for nearly 20 years, but their understanding is still in the initial perceptual stage. The reason is the lack of basic derivation. The derivation in this paper shows that the pressure gradient and starting pressure gradient of Darcy linear flow are constant, but the pressure gradient and starting pressure gradient of Darcy plane radial flow both are functions of radial radius. It is incorrect to directly apply the constant starting pressure gradient of linear flow to the plane radial flow equation. Although the pressure sensitivity effect of permeability exists, it can never be used in the flow equation of Darcy's law. Because constant permeability is the basis for the establishment of Darcy's law. Otherwise, it will shake the theoretical foundations of Ground Fluid Dynamics, Petroleum Reservoir Engineering and Reservoir Numerical Simulation.

**Key words:** starting pressure gradient, pressure sensitivity effects, rethink, derivation, review

Bear<sup>[1]</sup>和 Fatt<sup>[2]</sup>利用室内岩心模拟的测试资料,分别于1972年和1952年提出了启动压力梯度和压敏效应。在2000年以后,随着鄂尔多斯盆地致密低渗

( $K=0.1\sim 10$  mD,  $1$  mD= $0.9869\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}^2$ )油气藏的开发,启动压力梯度和压敏效应被中国有关专家学者视为两大重要课题,列入国家重点基础研究发展项

收稿日期:2020-12-10。

第一作者简介:陈元千(1933—),男,教授级高级工程师,1952年考入清华大学石油工程系,1956年毕业于原北京石油学院钻采系,从事油气藏工程、油气田开发和油气储量评价工作,发表论文近400篇。

目(973计划)、国家重大科技项目和国家自然科学基金项目等。大量的室内模拟实验研究表明对于低渗砂岩储层启动压力梯度和压敏效应是存在的。在近二十年间,尽管发表了诸如文献[3~32]的数百篇文章,但在理论上并没有太大的进展,仍停留在初期的感性认识阶段。甚至,将线性流的常数启动压力梯度直接用于平面径向流方程。同时,还将压敏效应直接用于产量公式。这些不正确的做法,在近一两年的期刊上仍然可见<sup>[30~32]</sup>,因此,可以说已到了必须指出和改正的时候。

## 1. 对启动压力梯度的反思与推导

Bear<sup>[1]</sup>于1972年,通过利用一维岩心进行室内模拟实验,研究低渗透地层达西定律应用的下限时,提出了启动压力梯度的概念及启动压力梯度存在的示意图(图1)。

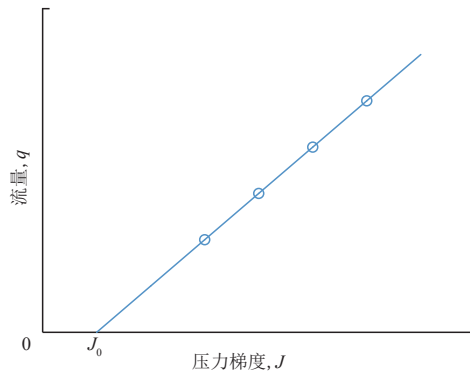


图1 Bear的压力梯度示意图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 The sketch graph of  $q$  vs.  $J$  of Bear<sup>[1]</sup>

Bear由图1提出了如下的关系式:

$$q = \frac{AK}{\mu}(J - J_0) \quad (1)$$

当 $J=J_0$ 时,(1)式中的 $q=0$ ;当 $J>J_0$ 时, $q>0$ ,即表明流体发生流动。

汪全林<sup>[5]</sup>发表的岩心测试资料(图2)表明,多数岩心并不具有启动压力梯度,而是通过原点的直线。

### 1.1 线性流的推导

对于均质、单相、稳定、恒温和层流的一维线性流动,Darcy(1856)根据实验建立的流量与压力梯度关系的微分式为:

$$q = \frac{AK}{\mu} \left( -\frac{dP}{dx} \right) \quad (2)$$

(2)式中压力梯度前的负号表示压力沿流体流

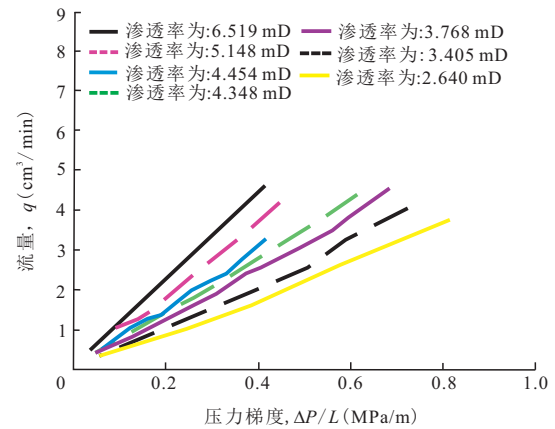


图2 流量与压力梯度的关系<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Relation between  $q$  and  $\Delta P/L$ <sup>[5]</sup>

动的方向是下降的。对(2)式分离变量,代入积分上下限后为:

$$-\int_{P_1}^{P_2} dP = \frac{q\mu}{AK} \int_0^L dx \quad (3)$$

由(3)式积分后得达西的线性流压力梯度与流量的正比关系为:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{AK} q \quad (4)$$

其中:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (5)$$

对于同一个岩心,若进行多次流量测试(一般为4次),可以得到多个相应的压力梯度与流量数据。将这些数据点按(4)式关系绘于直角坐标系中,可以得到一条通过原点的直线。这表明该岩心不存在启动压力梯度。如果两者是一条具有截距的直线,则表示存在启动压力梯度(图3),而且直线的截距就是启动压力梯度。因此,当存在启动压力梯度时,由(4)式可得:

$$\frac{\Delta P}{L} - \lambda_s = \frac{\mu}{AK} q \quad (6)$$

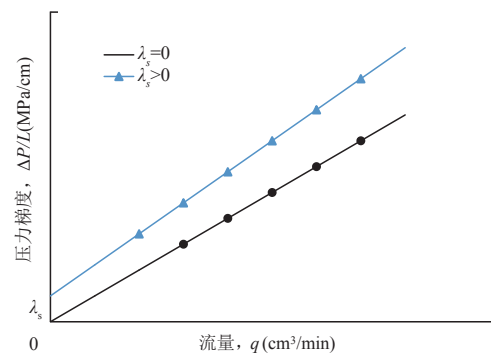


图3 线性流测试的 $\Delta P/L$ 与 $q$ 的关系

Fig. 3 Relation between  $\Delta P/L$  vs.  $q$  for the linear flow testing

由于线性流动的压力梯度和启动压力梯度均为常数,若将 $\Delta P/L$ 写为 $dP/dx$ 时,(6)式又可写为:

$$\frac{dP}{dx} - \lambda_s = \frac{\mu}{AK}q \quad (7)$$

由于 $v=q/A$ ,故(7)式可写为:

$$\frac{dP}{dx} - \lambda_s = \frac{\mu}{K}v \quad (8)$$

应该指出,线性流的上述推导,各项参数的单位均为SI制基础单位,当改为岩心测试的室内实用单位(见符号注释)表示时,(4)式和(8)式分别为:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{0.6AK}q \quad (9)$$

$$\frac{\Delta P}{dx} - \lambda_s = \frac{\mu}{0.6K}v \quad (10)$$

尽管,在理论分析上可以存在启动压力梯度 $\lambda_s$ ,但正如图2所示,大多数岩心的测试资料并不能反映启动压力的存在。也就是说,个别低渗透岩心是存在启动压力梯度的。

## 1.2 平面径向流的反思与推导

对于均质、单相、恒温、稳定和层流的达西定律,在地层条件下,流量的微分式为:

$$q = \frac{AK}{\mu} \left( \frac{dP}{dr} \right) \quad (11)$$

已知平面径向流不同径向位置的渗流面积为:

$$A = 2\pi rh \quad (12)$$

将(12)式代入(11)式得平面径向流的压力梯度为:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{q\mu}{2\pi Kh} \left( \frac{1}{r} \right) \quad (13)$$

由(13)式看出,平面径向流的压力梯度与径向半径 $r$ 为反比的函数关系,随 $r$ 数值的增加,压力梯度会显著的下降。现将(11)式改写为下式:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{K}v \quad (14)$$

由(14)式看出,平面径向流的压力梯度与流速成正比。但应当指出,达西定律的这一正比关系,在低速流动时是正确的。然而,在高速流动条件下,就会偏离这一正比关系。Forcheimer(1901)通过实验与理论研究提出了如下的二项式模型:

$$\frac{dP}{dr} = av + bv^2 \quad (15)$$

在(15)式中 $a$ 和 $b$ 两个常数,分别称为达西流动常数和非常数项常数<sup>[33-34]</sup>, $a=\mu/K$ 和 $b=\rho\beta$ ,这样(15)式可写为:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{K}v + \rho\beta v^2 \quad (16)$$

应当注意的是,对于平面径向流,(16)式等号右边的第1项为达西流动项,发生在远井地带;第2项为非达西流动项,发生在近井地带,因渗流面积的减小,流速的增加所引起的湍流影响。式中 $\beta$ 为高速湍流系数,或惯性阻力系数,或Forcheimer系数。应当注意的是,由于平面径向流的压力梯度不是常数,而是径向半径 $r$ 的函数,因此,其启动压力梯度也不是常数,而是径向半径 $r$ 的函数。当以 $\eta_s(r)$ 表示启动压力梯度时,由(16)式可得:

$$\frac{dP}{dr} - \eta_s(r) = \frac{\mu}{K}v + \rho\beta v^2 \quad (17)$$

上述平面径向流的推导中各项参数的单位均为SI制基础单位。当改为矿场实用单位(见符号注释)表示时,(17)式可写为:

$$\frac{dP}{dr} - \eta_s(r) = \frac{11.57\mu}{K}v + 1.34 \times 10^{-13} \rho\beta v^2 \quad (18)$$

应当注意的是,由于在(18)式中非常数的 $\eta_s(r)$ 的存在,该式是不能求解的。然而,对于高渗透性的油气井,并不存在启动压力梯度,即使对低渗透性的油气井,经过压裂,也不存在启动压力梯度。因此,在进行矿场产能测试时,均采用如下的二项式Quadratic Formula,求解油气井的绝对无阻流量和流入动态产能曲线(IPR):

$$\frac{dP}{dr} = \frac{11.57\mu}{K}v + 1.34 \times 10^{-13} \rho\beta v^2 \quad (19)$$

对于气藏,(19)式中气体在地层条件下的密度,由下式计算<sup>[35]</sup>:

$$\rho_g = \frac{3.4945\gamma_g P}{ZT} \quad (20)$$

在(19)式中的高速湍流系数,可由如下的相关经验公式确定<sup>[36]</sup>:

$$\beta = \frac{1.471 \times 10^{11}}{K^{1.387}} \quad (21)$$

## 2. 对压敏效应的反思与推导

所谓的压敏效应,是指地层渗透率随地层压力的下降而降低的现象。Fatt<sup>[2]</sup>于1952年利用室内岩心模拟实验研究结果得到了渗透率随上覆压力(Overburden Pressure)的增加而减小的现象(图4)。对此,后人称为压敏效应(Pressure Sensitivity)。在20世纪70年代美国岩心公司(Core Lab)提出用净上

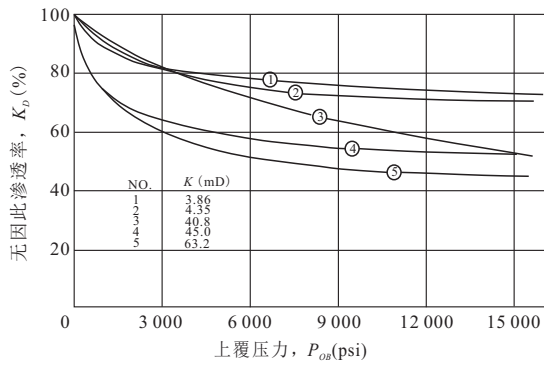


图4 Fatt的 $K_D$ 与 $P_{OB}$ 关系<sup>[2]</sup>(1 MPa=145.04 psi)  
Fig. 4 Relation between  $K_D$  and  $P_{OB}$  of Fatt<sup>[2]</sup>

覆压力(Net Overburden Pressure)代替上覆压力,进行压敏效应的解释。我国的专家学者采用美国的方法,绘制压敏效应的关系图,但其实这样的做法是缺少理论依据的。因此,本文给出如下的推导。

图5为渗透率 $K$ 随地层压力 $P$ 的变化关系。

由图5可以看出,随着地层压力的下降渗透率是降低的。假设渗透率随压力的递减率采用 Arps (1945)的定义为:

$$D = \frac{dK}{KdP} \quad (22)$$

由于渗透率随压力的下降而降低,因此,(22)式中的 $dK/dP$ 为负号。

将(22)式分离变量,代入积分上下限为:

$$D \int_{P_i}^P dP = \int_{K_i}^K \frac{dK}{K} \quad (23)$$

由(23)式积分可得下式:

$$K = K_i e^{-D(P_i - P)} \quad (24)$$

由(24)式看出,渗透率 $K$ 与地层压力降 $\Delta P$ 呈指数下降的关系。为了对压敏效应的渗透率与地层压力降进行无因次分析,设无因次渗透率和无因次地层压力降分别为:

$$K_D = K/K_i \quad (25)$$

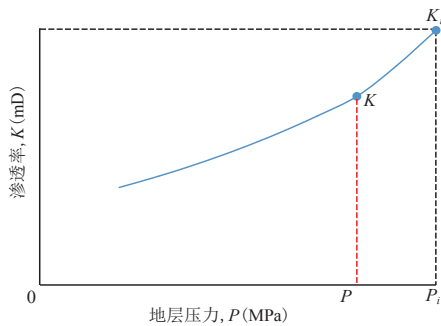


图5  $K$ 与 $P$ 的关系

Fig. 5 Relation between  $K$  and  $P$

$$\Delta P_D = D(P_i - P) \quad (26)$$

将(25)式和(26)式代入(24)式得无因次压敏效应关系式为:

$$K_D = e^{-\Delta P_D} \quad (27)$$

给予不同的 $\Delta P_D$ 值,由(27)式求得的无因次压敏效应图(图6)。由图6看出,当 $\Delta P_D > 3$ 时,压敏效应的影响很小。

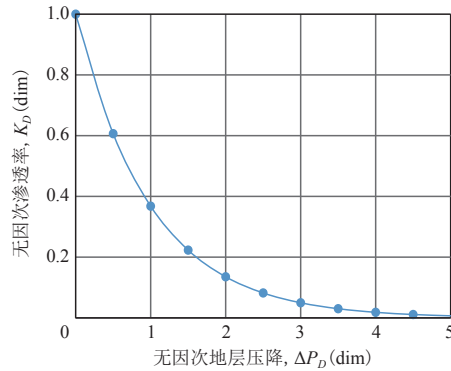


图6 无因次压敏效应图

Fig. 6 Dimensionless pressure sensitivity effects

国外将净上覆压力定义为上覆压力与地层压力的差值,即:

$$P_{NOB} = P_{OB} - P \quad (28)$$

由于 $P_{OB}$ 为常数,对(28)式微分得:

$$dP = -dP_{NOB} \quad (29)$$

将(29)式代入(22)式得:

$$D = -\frac{dK}{KdP_{NOB}} \quad (30)$$

对(30)式分离变量,代入积分上下限为:

$$D \int_{P_{NOB(i)}}^{P_{NOB}} dP_{NOB} = -\int_{K_i}^K \frac{dK}{K} \quad (31)$$

由(31)式积分可得,利用净上覆压力表示的压敏效应关系式为:

$$K = K_i e^{-D(P_{NOB} - P_{NOB(i)})} \quad (32)$$

将(32)式改写为下式:

$$K_D = e^{-D\Delta P_{NOB}} \quad (33)$$

其中:

$$\Delta P_{NOB} = P_{NOB} - P_{NOB(i)} \quad (34)$$

由(33)式看出, $K_D$ 与 $\Delta P_{NOB}$ 成指数下降关系,见图7。如果改为 $K_D$ 与 $P_{NOB}$ 作图,则在 $K_D=1$ 时,对应的 $P_{NOB} \neq 0$ ,而应等于 $P_{NOB(i)}$ (图8)。在文献[13]中已清楚地看到这一问题的存在,如图9所示,因此,利用 $K_D$ 与 $P_{NOB}$ 作图是不正确的。

如果将压敏效应的渗透率下降关系,代入平面

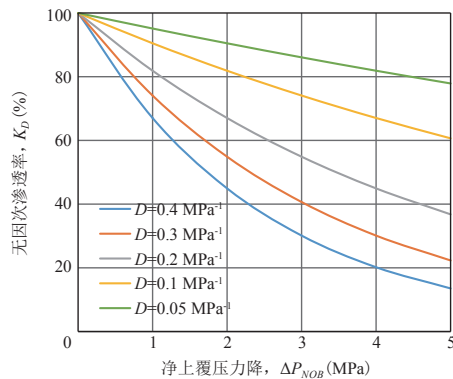


图7  $K_D$ 与 $\Delta P_{NOB}$ 的关系

Fig. 7 Relation between  $K_D$  and  $\Delta P_{NOB}$

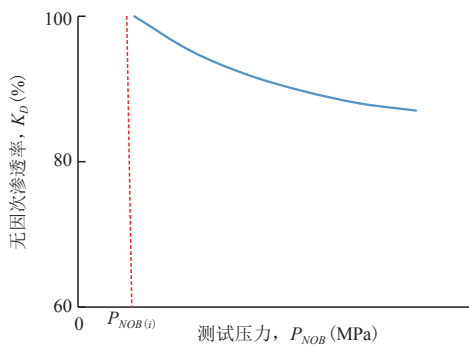


图8  $K_D$ 与 $P_{NOB}$ 关系

Fig. 8 Relation between  $K_D$  and  $P_{NOB}$

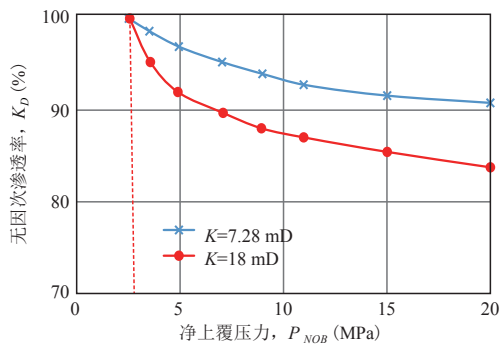


图9  $K_D$ 与 $P_{NOB}$ 关系<sup>[13]</sup>

Fig. 9 Relation between  $K_D$  and  $P_{NOB}$ <sup>[13]</sup>

径向流达西微分式为:

$$q = \frac{AK_i e^{-D(P_i - P)}}{\mu} \left( \frac{dP}{dr} \right) \quad (35)$$

由于在(35)式中存在变量 $P$ ,不但导致该式的无解,而且动摇了以常数渗透率为根基的达西定律。

### 3. 结论

通过本文的理论研究,对于启动压力梯度和压敏效应可以得到如下的初步结论。

1) 对于达西的线性流动,压力梯度和启动压力

梯度都是常量。Bear(1972)基于一维岩心模拟实验研究,提出了启动压力梯度的概念,而且线性流的压力梯度与流量成正比的直线关系。通过原点的直线不存在启动压力梯度,当直线具有截距时,则存在启动压力梯度。并且直线的截距就是启动压力梯度。应当强调指出,启动压力梯度只存在于致密低渗油气藏。

2) 对于平面径向流,压力梯度和启动压力梯度都不是常数,而是径向半径 $r$ 的函数,因此,得不到像线性流那样表述启动压力梯度的方法。特别指出,绝不能将线性流的启动压力梯度,用于平面径向流方程,笔者曾就此发表过专文<sup>[37]</sup>。对于致密低渗透地层的油气井,由于没有自然产能,必须经过压裂才能投产。因此,在这种情况下,启动压力梯度已失去实际意义。目前在国外的文献中,均看不到有关启动压力梯度引用的内容。

3) 国内外大量的室内岩心模拟实验结果表明,不同渗透率的岩心均存在压敏效应现象。通过本文的研究表明,压敏效应渗透率与地层压力降,或与净上覆压力降成指数的下降关系。在国内外的文献中常用的无量纲渗透率 $K_D$ 与净上覆压力 $P_{NOB}$ 的作图方法是不正确的。这样做的结果表明,在 $K_D=1$ 时, $P_{NOB} \neq 0$ ,而应当等于 $P_{NOB(i)}$ 。应强调指出,如果承认渗透率随压力而改变,那将会动摇达西定律建立的基础。

#### 符号注释

(圆括号内为实用单位)

$q$ —测试条件和地层条件的流量和产量, $m^3/s$ , (岩心  $cm^3/min$ , 矿场  $m^3/d$ );

$A$ —渗流面积, $m^2$ , (岩心  $cm^2$ , 矿场  $m^2$ );

$D$ —渗透率随压降的递减率, $Pa^{-1}$ , ( $MPa^{-1}$ );

$h$ —厚度, $m$ , (岩心  $cm$ );

$K$ —渗透率, $m^2$ , ( $mD$ );

$K_i$ —初始渗透率, $m^2$ , ( $mD$ );

$K_D$ —无量纲渗透率,  $frac$ , ( $frac$ );

$\mu$ —岩心测试流体的黏度或地层流体黏度, $Pa \cdot s$ , ( $mPa \cdot s$ );

$L$ —岩心长度, $m$ , (岩心  $cm$ );

$r$ —径向半径, $m$ , ( $m$ );

$x$ —线性流动距离, $m$ , (岩心  $cm$ );

$P$ —压力或目前地层压力, $Pa$ , ( $MPa$ );

$P_i$ —原始地层压力, $Pa$ , ( $MPa$ );

$P_1$ —岩心的入口压力, $Pa$ , ( $MPa$ );

$P_2$ —岩心的出口压力, $Pa$ , ( $MPa$ );

$P_{OB}$ —上覆压力, Pa, (MPa);  
 $P_{NOB}$ — $P$ 压力下的净上覆压力, Pa, (MPa);  
 $P_{NOB(i)}$ — $P_i$ 压力下的净上覆压力, Pa, (MPa);  
 $\Delta P$ —岩心的测试压差, Pa, (MPa);  
 $\Delta P_D$ —无因次压降, dim, (dim);  
 $\Delta P/L$ —岩心的压力梯度, Pa/m, (岩心 MPa/cm, 矿场 MPa/m);  
 $dP/dx$ —线性流的压力梯度, Pa/m, (矿场 MPa/m);  
 $dP/dr$ —平面径向流的压力梯度, Pa/m, (矿场 MPa/m);  
 $\Delta P_{NOB}$ —净上覆压力降, Pa, (MPa);  
 $J$ —Bear的压力梯度, Pa/m, (岩心 MPa/cm, 矿场 MPa/m);  
 $J_0$ —Bear的启动压力梯度, Pa/m, (岩心 MPa/cm);  
 $\lambda_s$ —线性流的启动压力梯度, Pa/m, (岩心 MPa/cm);  
 $\eta_s(r)$ —平面径向流的启动压力梯度, Pa/m, (MPa/m);  
 $v$ —渗流速度, m/s, (cm/s);  
 $\rho$ —流体密度, kg/m<sup>3</sup>, (g/cm<sup>3</sup>);  
 $\rho_g$ —地层气体密度, kg/m<sup>3</sup>, (g/cm<sup>3</sup>);  
 $\gamma_g$ —气体的相对密度, (dim);  
 $Z$ —气体偏差系数, (dim);  
 $T$ —气体绝对温度, K, (K);  
 $\beta$ —高速湍流系数, m<sup>-1</sup>, (m<sup>-1</sup>)。

## 参考文献

- [1] Bear, J.: Dynamic of fluid in porous media, American Elsevier Publishing Company, Inc., 1972, 127-128.
- [2] Fatt, I., Davis, T.S.: Reduced in permeability with overburden pressure, Petroleum Trans. AIME, 1952, 195, 329.
- [3] 黄雨, 李晓平, 谭晓华, 等: 考虑启动压力梯度的复合气藏不稳定压力动态分析, 新疆石油地质, 2019, 40(2)235-243。  
Huang Yu, Li Xiaoping, Tan Xiaohua, et al: Dynamic analysis on unsteady pressure of composite gas reservoirs with consideration of threshold pressure gradient, Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2)235-243.
- [4] 王晓冬, 侯晓春, 郝明强, 等: 低渗透介质有启动压力梯度的不稳态压力分析, 石油学报, 2011, 32(5)847-851。  
Wang Xiaodong, Hou Xiaochun, Hao Mingqiang, et al: Pressure transient analysis in low-permeable media with threshold gradients, Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5), 847-851.
- [5] 汪全林, 唐海, 吕栋梁, 等: 低渗透油藏启动压力梯度实验研究, 油气地质与采收率, 2011, 18(1)97-100。  
Wang Quanlin, Tang Hai, Lü Dongliang, et al: An experimental study on threshold pressure gradient in low permeability reservoir, Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1), 97-100.
- [6] 许家峰, 孙福街, 田冀, 等: 考虑启动压力梯度时普通稠油非线性渗流模型解析求解方法, 中国海上油气, 2011, 23(1)32-35。  
Xu Jiafeng, Sun Fujie, Tian Ji, et al: An analytic solution method of nonlinear seepage models with ordinary heavy oil when taking threshold pressure gradient into consideration, China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(1) 32-35.
- [7] 蒋裕强, 高阳, 徐厚伟, 等: 基于启动压力梯度的亲水低渗透储层物性下限确定方法——以蜀南河包场地区须家河组气藏为例, 油气地质与采收率, 2010, 17(5)57-60。  
Jiang Yujiang, Gao Yang, Xu Houwei, et al: New method for determining cut-off parameter in hydrophilic and low permeable sandstone reservoir—case of gas reservoir in Hebaochang area, Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5)57-60.
- [8] 高海红, 程林松, 冯儒勇: 考虑启动压力梯度的低渗气藏水平井产能计算, 天然气工业, 2008, 28(7)75-77。  
Gao Haihong, Cheng Linsong, Feng Ruyong: Productivity calculation of horizontal wells in low-permeability gas reservoirs considering starting pressure gradient, Natural Gas Industry, 2008, 28(7)75-77.
- [9] 李浩, 赵鹏大, 刘柏林: 拟启动压力对低渗透单相流体及油水两相渗流的影响——以沙埕油田沙7断块为例, 油气地质与采收率, 2008, 15(1)84-86。  
Li Hao, Zhao Pengda, Liu Bolin: Effects of starting pressure on single phase fluid and oil/water two-phase fluid flow in low permeability reservoir—case study in Sha 7 fault block in Shanian Oilfield, Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1)84-86.
- [10] 李爱芬, 张少辉, 刘敏, 等: 一种测定低渗透气藏启动压力的新方法, 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(1)68-71。  
Li Aifen, Zhang Shaohui, Liu Min, et al: A new method of measuring starting pressure for low permeability reservoir, Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(1)68-71.
- [11] 郭肖, 伍勇: 启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透气藏水平井产能的影响, 石油与天然气地质, 2007, 28(4)539-543。  
Guo Xiao, Wu Yong: Influence of start-up pressure gradient and stress sensitivity on productivity of low-permeability gas reservoirs, Oil & Gas Geology, 2007, 28(4)539-543.
- [12] 何贤科: 确定低渗透储层启动压力梯度的新方法, 石油地质与工程, 2007, 21(5)80-84。  
He Xianke: A new method of determining the starting pressure gradient in low permeability reservoirs, Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(5)80-84.
- [13] 郝明强, 杨正明, 刘学伟, 等: 裂缝性低渗透油藏压力敏感性研究, 新疆石油地质, 2006, 27(4)471-473。  
Hao Mingqiang, Yang Zhengming, Liu Xuewei, et al: A study on pressure sensitivity of fractured low-permeability reservoirs, Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(4)471-473.
- [14] 赵国忠: 变启动压力梯度三维三相渗流数值模拟方法, 石油学报, 2006, 27(S1)119-128。  
Zhao Guozhong: Numerical simulation of 3D and three-phase flow with variable start-up pressure gradient, Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(S1)119-128.
- [15] 罗瑞兰, 程林松, 彭建春, 等: 油气储层渗透率应力敏感性与启动压力梯度的关系, 西南石油学院学报, 2005, 27(3)20-22。  
Luo Ruilan, Cheng Linsong, Peng Jianchun, et al: The relationship between stress-sensitivity permeability and starting pressure gradient of reservoir, Journal of Southwestern Petroleum Institute, 2005, 27(3)20-22.
- [16] 韩洪宝, 程林松, 张明禄, 等: 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, 石油大学学报(自然科学版),

- 2004, 28(6)49-53.
- Han Hongbao, Cheng Linsong, Zhang Minglu, et al: Physical simulation of ultra-low permeability reservoir in consideration of starting pressure gradient, *Journal of China University of Petroleum*, 2004, 28(6)49-53.
- [17] 阮敏,王连刚:低渗透油田开发与压敏效应,石油学报, 2002, 23(3)73-76.
- Ruan Min, Wang Liangang: Low-permeability oilfield development and pressure-sensitive effect, *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(3) 73-76.
- [18] 阮敏:压敏效应对低渗透油田开发的影响,西安石油学院学报(自然科学版), 2001, 16(4)40-41.
- Ruan Min: Effect of pressure-sensitive damage on the development of low permeability reservoirs, *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 2001, 16(4)40-41.
- [19] 孙龙德,宋文杰,江同文:克拉2气田储层应力敏感性及对产能影响的实验研究,中国科学(D辑:地球科学), 2004, 34(S1)134-142.
- [20] 李治平,万怡奴,张喜亭:低渗透气藏气井产能评价新方法,天然气工业, 2007, 27(4)85-87.
- Li Zhiping, Wan Yiwen, Zhang Xiting: A new method for deliverability analysis of gas wells in low-permeability reservoirs, *Natural Gas Industry*, 2007, 27(4)85-87.
- [21] 何军,胡永乐,何东博,等:低渗透致密气藏产能预测方法,断块油气田, 2013, 20(3)334-336.
- He Jun, Hu Yongle, He Dongbo, et al: Productivity prediction methods for tight gas reservoir with low permeability, *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(3)334-336.
- [22] 姜瑞忠,李林凯,徐建春,等:低渗透油藏非线性渗流新模型及试井分析,石油学报, 2012, 33(2)264-268.
- Jiang Ruizhong, Li Linkai, Xu Jianchun, et al: A nonlinear mathematical model for low-permeability reservoirs and well-testing analysis, *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2)264-268.
- [23] 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,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, *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(4)493-497.
- [24] 闫栋栋,杨满平,田乃林,等:低流量油藏渗流特征研究——以中国中东部某油田低流量油藏为例,油气地质与采收率, 2010, 17(6)90-93.
- Yan Dongdong, Yang Manping, Tian Nailin, et al: Fluid mechanics study on low fluidity reservoir—case study of one low fluidity reservoir in central and east China, *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(6)90-93.
- [25] 宋传真,郑荣臣:致密低渗气藏储层应力敏感性及其对单井产能的影响,大庆石油地质与开发, 2006, 25(6)47-49.
- Song Chuazhen, Zheng Rongchen: Stress sensitivity of low-permeability tight gas reservoir and its effect on single well productivity, *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25(6)47-49.
- [26] 李凡华,刘慈群:含启动压力梯度的不定常渗流压力动态分析,油气井测试, 1997, 6(1)1-4.
- Li Fanhua, Liu Ciqun: Pressure transient analysis for unsteady porous flow with start-up pressure derivative, *Well Testing*, 1997, 6(1)1-4.
- [27] 王思志,韩小妹,黄远智:低渗岩石非线性渗流机理讨论,岩土力学, 2003, 24(S2)120-124.
- Wang Enzhi, Han Xiaomei, Huang Yuanzhi: Discussion on the mechanism of percolation in low permeability rocks, *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(S2)120-124.
- [28] 郑维师,刘易非:低渗砂岩气藏中压敏效应对产能的影响,天然气工业, 2004, 24(12)113-115.
- Zheng Weishi, Liu Yifei: Influence of pressure-sensitive effect on productivity of low permeable sand gas reservoirs, *Natural Gas Industry*, 2004, 24(12)113-115.
- [29] 姜汉桥,姚军,姜瑞忠:油藏工程原理与方法,东营:石油大学出版社, 2001, 37-40.
- [30] 苏玉亮,蔡明玉,孟凡坤,等:低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱试井解释方法,油气地质与采收率, 2020, 27(1)113-119.
- Su Yuliang, Cai Mingyu, Meng Fankun, et al: Well testing interpretation method for CO<sub>2</sub> flooding in low permeability oil reservoirs, *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(1)113-119.
- [31] 姜汉桥,赵玉云,陈强,等:致密油藏水平井压裂裂缝参数优化方法,中国海上油气, 2020, 32(3)77-85.
- Jiang Hanqiao, Zhao Yuyun, Chen Qiang, et al: Optimal method of fracture parameters for horizontal well fracturing in tight oil reservoir, *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(3)77-85.
- [32] 张景,王颖,范希彬,等:致密砂砾岩储层应力敏感性评价研究,中国海上油气, 2020, 32(3)105-110.
- Zhang Jing, Wang Ying, Fan Xibin, et al: Evaluation study on the stress sensitivity of tight glutenite reservoir, *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(3)105-110.
- [33] Cornell, D., Donald, L., Katz, D.L.: Flow of gases through porous media, *Industrial & Engineering Chemistry*, 1953, 45(10) 2145-2152.
- [34] Green, L., Duwez, P.: Fluid flow through porous media, *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18(1)39-45.
- [35] 陈元千:现代油藏工程(第2版),石油工业出版社,北京, 2020, 11-16.
- Chen Yuanqian: *Modern petroleum reservoir engineering (Second Edition)*, Petroleum Industry Press, Beijing, 2020, 11-16.
- [36] 陈元千,邹存友,杨皓,等:利用气井测试资料建立湍流系数的新公式,断块油气田, 2010, 17(3)320-324.
- Chen Yuanqian, Zou Cunyou, Yang Hao, et al: A new formula for establishing turbulence coefficient from testing data of gas wells, *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2010, 17(3)320-324.
- [37] 陈元千:线性流的启动压力梯度不能用于平面径向流方程,石油学报, 2011, 32(6)1088-1092.
- Chen Yuanqian: Improper use of the starting pressure gradient of linear flow in the plane radial flow equation, *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(6)1088-1092.

(编辑 王隽)