

# 稠油非线性渗流测定方法研究

汪伟英<sup>1,2</sup>, 喻高明<sup>1,2</sup>, 柯文丽<sup>1,2</sup>, 王雨<sup>1,2</sup>, 戈月<sup>1,2</sup>

(1. 长江大学(武汉)石油工程学院, 武汉 430100;

2. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 武汉 430100)

**摘要:**稠油由于其非牛顿特性,在多孔介质中的渗流特征与常规原油不同,一般表现为非线性渗流,其特征之一是可能存在启动压力梯度,只有当驱替压力梯度超过启动压力梯度时稠油才开始流动,且渗流规律偏离达西定律。通过室内实验研究,设计了合理测量启动压力梯度的方法。利用天然岩心与实验室配制的模拟油,设定不同的驱替流量来测量启动压力梯度,研究实验测量启动压力梯度过程中驱替流量对测量结果的影响。结果表明,当驱替流量超过某一临界值时,测量得到的启动压力梯度会受到驱替流量的影响。因此,在测量岩心真实启动压力梯度的过程中,实验方法和驱替流量的选择不容忽视。

**关键词:**稠油;非线性渗流;启动压力梯度;实验研究

中图分类号:TE345

文献标识码:A

## Experimental study of nonlinear seepage for heavy oil

Wang Weiyang<sup>1,2</sup>, Yu Gaoming<sup>1,2</sup>, Ke Wenli<sup>1,2</sup>, Wang Yu<sup>1,2</sup>, Ge Yue<sup>1,2</sup>

(1. *Petroleum Engineering Institute, Yangtze University (Wuhan Campus), Wuhan, Hubei 430100, China;*

2. *Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Wuhan, Hubei 430100, China)*

**Abstract:** Due to the non-Newtonian behavior of heavy oil, the seepage characteristics in porous medium are different from conventional crude oil. They usually seep in nonlinear ways and there might exist threshold pressure gradients. Only when the displacement pressure gradient is greater than the threshold pressure gradient, heavy oil begins to flow, and the seepage rule deviates from Darcy's law. Through laboratory experiments, this paper designs a method for measuring threshold pressure gradient appropriately. Natural core samples and simulated oil are used to measure threshold pressure gradient by setting different flow rates. In this way, the impact of flow rate on threshold pressure gradient is studied. The results show that the threshold pressure gradient would be affected when the displacing rate exceeds a critical value. Therefore, in the process of measuring real threshold pressure gradient of a core, the choice of experimental method and displacing rate can not be ignored.

**Key words:** heavy oil; nonlinear seepage; threshold pressure gradient; experimental study

随着常规原油储量的逐年递减,稠油资源越来越受到人们的关注,如何有效和高效开发稠油油藏也成为当今石油行业的热门话题,正确认识地层流体在多孔介质中的渗流规律是开发好油藏的基础。稠油由于其非牛顿特性<sup>[1]</sup>,在多孔介质中的渗流特征与常规原油不同,一般表现为非线性渗流,其特征之一是可能存在启动压力梯度,只有当驱替压力梯度超过启动压力梯度时稠油才开始流动,且渗流规律偏离达西定律<sup>[2]</sup>。

由于岩石真实启动压力梯度的大小与岩石、流体本身的性质有关,所以在岩心与流体性质一定的条件下,岩石的真实启动压力梯度为一恒定值。但在实验过程中,测量得到的启动压力梯度值往往会受到实验方法的影响,导致对于同一岩心、同一流

体,用不同实验方法所测量得到的启动压力梯度不同。为了能够测量得到岩石的真实启动压力梯度,通过对以往实验方法对比分析,选取合适的方法加以改进。另外,笔者认为除了实验方法对于启动压力梯度的测量结果会有直接的影响以外,驱替流量也很有可能影响测量结果的准确性,因此,本文重点研究驱替流量对启动压力梯度测量结果的影响,测定不同粘度原油、不同渗透率岩心下的启动压力梯度以及渗流曲线。

## 1 非线性渗流实验研究现状

### 1.1 稳态法

在非线性渗流实验研究中,稳态法是最为常见的测量渗流曲线的方法,其中包括恒压法与恒流

法。恒压法是通过设定岩心入口端的压力,测量该压力下岩心出口端的液体流量,直至流量达到一稳定值;然后逐渐增加岩心入口端的压力,测量不同压力下的稳定流量,根据稳定时的流量与压差,绘制渗流曲线<sup>[3]</sup>。恒流法则是通过设定岩心入口端的流量,记录稳定时岩心出口端的流量,绘制渗流曲线<sup>[4]</sup>。之后,利用曲线在压差坐标轴上的截距来求取岩心的启动压力梯度<sup>[3-5]</sup>。利用该方法得到的启动压力梯度并非岩石的真实启动压力梯度,且不能对流体进行正确的描述<sup>[5]</sup>。

## 1.2 非稳态法

非稳态法是在非稳态渗流中测量压力的实验方法,该方法在研究非线性渗流规律时,主要用于确定启动压力梯度。通过建立不稳定渗流方程,并用有限差分方法进行数值求解,得到岩心封闭端的不稳定无量纲压力曲线。在双对数坐标图上,用实测压力数据和理论无量纲压力曲线拟合,求出岩心的启动压力梯度<sup>[6-8]</sup>。非稳态法是通过试井解释的方法来确定启动压力梯度,测出的启动压力梯度认为是拟启动压力梯度,要大于岩石的真实启动压力梯度。

## 1.3 毛细管平衡法、稳态法

利用“毛细管平衡法”测量启动压力梯度,“稳态法”确定流量—压差曲线的方法保证了非线性渗流曲线的完整性。其中,吕成远<sup>[9]</sup>所采用的“毛细管平衡法”应用的是连通器原理,测量启动压力梯度时在岩心进出口端连接毛细管,重力的作用会使进口端流体通过岩心流向出口端。两端液面经过充分平衡后,最终会保持一个高度差,该高度差即是该样品的最小启动压力值。这种方法测量过程耗时,明显降低了实验的效率。之后,李爱芬<sup>[10]</sup>建立了一种新的“毛细管平衡法”,以小流速进行驱替至岩心出口端液面开始流动,关闭进液开关,记录不同时刻汞柱压差计上的液柱高度,直至液柱高度稳定,由此计算岩心的启动压力及启动压力梯度。

## 1.4 非稳态驱替—毛细管法、稳态法

“非稳态驱替—毛细管计量法”是通过在岩心夹持器出口端充满液体,然后以微流量注入液体,待岩心出口端液面开始移动,此时的压力即为最小启动压力<sup>[11]</sup>。也有研究人员认为观测毛细管中液面向前移动瞬间难度很大,因此,通过记录液面发生单位刻度位移来判断岩心中流体的流动。当液面发生单位位移,停泵并关闭入口端阀门,最终通过平衡法求出最小启动压力,即当毛细管中液面不再移动且精密仪表读数不变时,此时读取的仪表压

力值就是此岩心最小启动压力<sup>[12]</sup>。该方法能够明显缩短测量启动压力梯度的时间,但对于微流量的选择并没有一定的说明,驱替流量很可能会直接影响到测量得到的启动压力梯度的结果<sup>[13-18]</sup>。

## 2 稠油渗流规律实验研究

实验首先研究驱替流量对启动压力梯度测量结果的影响,之后研究不同粘度原油、不同渗透率岩心稠油单相渗流规律,包括启动压力梯度以及渗流曲线的测定。

### 2.1 启动压力梯度测定方法

#### 2.1.1 实验方法与条件

1)实验方法:首先将天然岩心完全饱和模拟油,静置 24 h,让模拟油在岩心内有足够的时间老化。采用设定特低流量逐渐建立岩心两端压差的方法来直接测定岩石真实启动压力梯度,即在特低速条件下将液体驱替到岩心入口端,逐渐建立入口压力,观察岩心出口端有液体出现时,记录此时的压力(为了更加精确的测量岩心两端的压差,以液柱高度作为压差计)。之后将岩心静置老化 8 h,换不同的驱替流量进行启动压力梯度测量。最后,换不同粘度模拟油、不同渗透率岩心,测量不同驱替流量下的启动压力梯度。

2)实验条件:采用与 QHD32-6 油田、SZ36-1 油田渗透率级别相近的天然岩心,以机油与煤油混合配制的模拟油作为实验用油,在 25 °C 时模拟油粘度分别为 81.855 9,145.727 5,198.798 mPa·s。岩心基本参数见表 1。

#### 2.1.2 实验结果及讨论

针对同一块岩心,测量不同粘度、不同驱替流量下的启动压力梯度(表 2)。测量得到不同渗透率岩心、不同驱替流量下的启动压力梯度如表 3 所示。

由表 2,3 可以看出,在不同渗透率、不同粘度模拟油条件下,驱替流量与启动压力梯度测量值有如下的规律:

1)由于岩石的真实启动压力梯度只与岩石的本身性质和流体的性质有关,而同一块岩心、同一粘度模拟油条件下所测得的启动压力梯度为一固定值,与驱替流量无关,认为当驱替流量小于等于临

表 1 岩心基本参数

Table 1 Basic parameters of core

岩心号	岩心长度/cm	岩心直径/cm	孔隙度/%	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
G43-21-20	4.234	2.530	19.90	361.97
G43-21-9	4.846	2.535	19.57	500.15

表2 不同粘度、不同驱替流量下测得的启动压力梯度(G43-21-20号岩心)

Table 2 Threshold pressure gradient of different viscosity and displacing rate (core sample G43-21-20)

Table with 4 columns: Displacing rate (mL·min⁻¹), Viscosity 81.8559 mPa·s, Viscosity 145.7275 mPa·s, Viscosity 198.798 mPa·s. Rows show data for displacing rates from 0.001 to 0.010 mL/min.

表3 不同渗透率、不同驱替流量下测得的启动压力梯度(粘度为81.8559 mPa·s)

Table 3 Threshold pressure gradient of different permeability and displacing rate (viscosity: 81.8559 mPa·s)

Table with 4 columns: Displacing rate (mL·min⁻¹), Permeability 361.97×10⁻³ μm², Permeability 500.15×10⁻³ μm². Rows show data for displacing rates from 0.001 to 0.010 mL/min.

界值时所测得的启动压力梯度不受驱替流量的影响,此时测得的启动压力梯度为岩石的真实启动压力梯度;当驱替流量超过临界值时,由于岩心入口端压力上升很快,导致所测得的启动压力梯度大于岩石的真实启动压力梯度,并随着驱替流量的不断增加,测量得到的启动压力梯度与真实岩石启动压力梯度的偏差越大。

2) 由表2,3可以看出,驱替流量的临界值与

岩心的渗透率、原油粘度无关。所以可以认为,当驱替流量小于等于0.003 mL/min时,测量得到的启动压力梯度即为岩石的真实启动压力梯度。但由于流量过小时会导致测量启动压力梯度的时间过长,所以,为了保证实验的精确度与实验效率等,我们选用0.003 mL/min这一临界流量作为以下测量启动压力梯度的驱替流量。

2.2 稠油非线性渗流曲线测定

2.2.1 实验方法与条件

采用与QHD32-6油田、SZ36-1油田渗透率级别相近的天然岩心,实验温度为25℃,进行不同渗透率相同原油粘度和不同原油粘度相同渗透率稠油渗流规律研究。用稳态法测定稠油渗流曲线。

2.2.2 实验结果及讨论

不同渗透率相同粘度、不同粘度相同渗透率稠油渗流规律实验结果见表4与图1,2。

由不同渗透率相同粘度渗流实验结果(图1)可知:①岩心气测渗透率越低,曲线越向右下方偏移。这是由于渗透率越低,岩石孔隙越小,在同样的压差下流速越低,使较细孔隙中的流体全部参与流动需要的压力梯度越大,因此曲线右移;②岩心气测渗透率越低,启动压力梯度越大。这是由于岩石喉道越细,固体表面对边界层流体作用力越大,

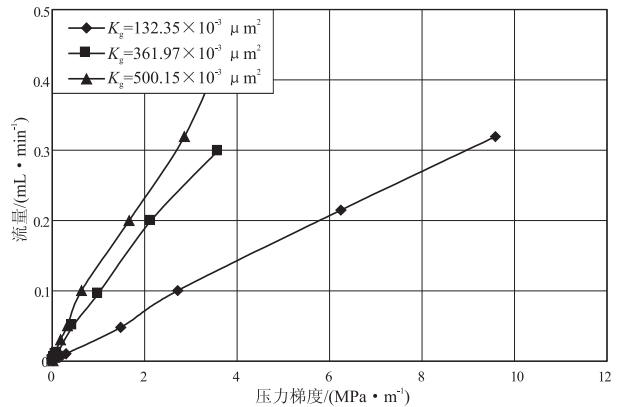


图1 不同渗透率相同粘度渗流曲线

Fig. 1 Seepage curve of fixed viscosity and changed permeability

表4 渗流规律实验数据

Table 4 Laboratory data of seepage rule

Table with 6 columns: Core No., Core Length/cm, Core Diameter/cm, Gas Permeability/10⁻³ μm², Simulated Oil Viscosity/(mPa·s), and Threshold Pressure Gradient/(MPa·m⁻¹). Rows list data for core samples G43-21-9, G43-21-20, G93-2-1, G93-9-2, and G78-3.

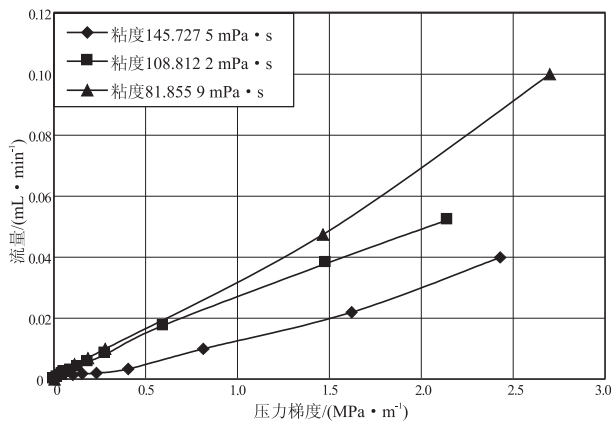


图2 相同渗透率不同粘度渗流曲线

Fig. 2 Seepage curve of fixed permeability and changed viscosity

流体流动所需克服的阻力越大,从而导致渗透率越大,启动压力梯度越小。

由相同渗透率不同粘度渗流实验结果(图2)可知:①原油粘度越大,渗流曲线越向右下方偏移,非线性段越大。因此,在同一压差下流量越小,流动所需的启动压力梯度就越大;②原油粘度越大,启动压力梯度越大。

### 3 结论

1) 驱替流量的大小会影响启动压力梯度的测量结果,低流量下测得的启动压力梯度不受驱替速度的影响;流量过高时,由于岩心入口端压力上升很快,此时的启动压力梯度受到驱替速度的影响。

2) 由于驱替流量的临界值与岩心的渗透率、原油粘度无关,因此选用 0.003 mL/min 这一临界流量作为测量启动压力梯度的驱替流量。

3) 稠油渗流规律研究表明,在相同原油粘度条件下,岩心气测渗透率越低,曲线越向压力梯度轴偏移,启动压力梯度随渗透率的增加而减小;在相同渗透率条件下,原油粘度越大,渗流曲线越向压力梯度轴偏移,非线性段越大,启动压力梯度随流体粘度的增大而增大。

### 参考文献:

- [1] 张跃雷,程林松,李春兰,等. 稠油流变性及启动压力梯度的实验研究[J]. 新疆石油天然气,2007,3(3):28-30.
- [2] 田冀,许家峰,程林松. 普通稠油启动压力梯度表征及物理模拟方法[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(3):158-162.
- [3] 许家峰,程林松,李春兰,等. 普通稠油油藏启动压力梯度求解方法与应用[J]. 特种油气藏,2006,13(4):53-57.
- [4] 吴凡,孙黎娟,乔国安,等. 岩心启动压力梯度测定实验条件优选[J]. 河南石油,2006,20(3):79-80.
- [5] 闪从新,王道成. 流体启动压力梯度实验研究[J]. 油气田地面工程,2010,29(4):30-32.
- [6] 杨琼,聂孟喜,宋付权. 低渗透砂岩渗流启动压力梯度[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(12):1650-1652.
- [7] 宁丽华. 稠油拟启动压力梯度测定实验方法及应用[J]. 石油化工高等学校学报,2011,24(1):59-63.
- [8] 宋付,刘慈群,吴柏志. 启动压力梯度的不稳定快速测量[J]. 石油学报,2001,22(3):67-70.
- [9] 吕成远,王建,孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J]. 石油勘探与开发,2002,29(2):86-89.
- [10] 李爱芬,张少辉,刘敏,等. 一种测定低渗油藏启动压力的新方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(1):68-71.
- [11] 石京平. 低渗透油田油水两相低速非达西渗流规律研究[D]. 成都:成都理工大学,2006.
- [12] 张代燕,王子强,王殿生,等. 低渗透油藏最小启动压力梯度实验研究[J]. 新疆地质,2011,29(1):106-109.
- [13] Kadet V, Polonsky D. Percolation Modelling and Non-Newtonian Flows in Oil Reservoirs[M]. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1997.
- [14] Yun Meijuan, Yu Boming, Cai Jianchao. A fractal model for the starting pressure gradient for Bingham fluids in porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(5-6): 1402-1408.
- [15] 徐德敏,黄润秋,刘永平,等. 非达西渗流拟启动压力梯度推算[J]. 工程地质学报,2011,19(2):225-230.
- [16] 汪全林,唐海,吕栋梁,等. 低渗透油藏启动压力梯度实验研究[J]. 油气地质与采收率,2011,18(1):97-100.
- [17] Wang Shaojun, Huang Yanzhang, Civan F. Experimental and theoretical investigation of the Zaoyuan field heavy oil flow through porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 50(2): 83-101.

(编辑 黄娟)