

# 低渗透油藏聚合物驱启动压力梯度研究

王友启, 于洪敏, 刘平, 许关利, 张莉, 聂俊

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**为了描述低渗透油藏聚合物驱的渗流规律及启动压力梯度特征,借鉴水驱启动压力梯度的试验测定方法,将压差-流量法和毛细管平衡法相结合,在不同储层渗透率和体系黏度下开展低渗透储层聚合物驱渗流试验;在此基础上,基于非线性渗流理论量化表征聚合物驱启动压力梯度,建立聚合物驱非线性渗流系数与体系黏度、储层渗透率和流度的量化关系。结果表明,随着储层渗透率的降低或体系黏度的增大,相同渗流速度下聚合物驱的渗流阻力增加、压力梯度增大;聚合物驱曲线用非线性方法表征吻合较好,且随着储层渗透率降低、体系黏度增大或流度降低,聚合物驱非线性渗流系数均增大;流态图版包含对不流动区、非线性渗流区和拟线性渗流区的定量描述。

**关键词:**低渗透; 聚合物驱; 启动压力梯度; 非线性渗流; 试验; 表征; 图版

**中图分类号:**TE 312 **文献标志码:**A

**引用格式:**王友启,于洪敏,刘平,等. 低渗透油藏聚合物驱启动压力梯度研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015,39(4):126-130.

WANG Youqi, YU Hongmin, LIU Ping, et al. Start-up pressure gradient of polymer flooding in low permeability reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(4):126-130.

## Start-up pressure gradient of polymer flooding in low permeability reservoirs

WANG Youqi, YU Hongmin, LIU Ping, XU Guanli, ZHANG Li, NIE Jun

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Polymer flooding experiments are conducted using cores with different permeability and polymer solutions with different viscosity, in order to study the flow behavior in porous media and the characteristics of the start-up pressure gradient for polymer injection in oil reservoirs with low permeability. A combined method of differential pressure via flow rate and capillary equilibrium was used in the core flooding experiments. Based on the theory of nonlinear flow in porous media, the start-up pressure gradient for polymer flooding was characterized quantitatively, and was correlated with the non-linear flow coefficient, the viscosity of polymer solution, the permeability of the core and fluid's mobility. A flow chart of polymer flow in low permeability reservoirs has been figured out. The results show that the flow resistance and the start-up pressure gradient increase with the decrease of core permeability and the increase of polymer viscosity. The flow behavior of polymer solutions in porous media can be well described using the nonlinear characterization method, and the nonlinear flow coefficient increases with the decrease of core's permeability and the fluid mobility, and it increases with the increase of polymer viscosity. The flow chart can give a quantitative description of different flow regions, such as no-flow zones, non-linear and quasi-linear flow zones.

**Keywords:** low permeability; polymer flooding; start-up pressure gradient; non-linear flow; experiment; flow characterization; chart

低渗透油藏启动压力梯度明显,实施聚合物驱后启动压力梯度影响更为突出<sup>[1]</sup>。目前,水驱启动

压力梯度的试验测定方法已相对成熟,常规的方法主要有压差-流量和毛细管平衡法<sup>[2-3]</sup>。丛苏男

等<sup>[1]</sup>利用压差-流量法开展了聚合物驱和聚/表二元复合驱启动压力梯度试验研究,但仅针对饱和水岩心进行试验,对于残余油下聚合物驱启动压力梯度的测试并未见文献报道。水驱启动压力梯度有多种表征方法<sup>[4]</sup>,其中拟启动压力梯度方法比较成熟,但其缺点是过于夸大了流体渗流阻力。笔者借鉴水驱启动压力梯度试验方法及低渗透油藏非线性渗流理论,在残余油饱和度下开展低渗透储层聚合物驱渗流试验,并用非线性表征方法量化表征聚合物驱渗流曲线,从而描述低渗透油藏聚合物驱启动压力梯度特征。

## 1 聚合物驱渗流试验

### 1.1 试验条件

试验设备主要包括高精度微流量泵(精度0.001 mL/min)、围压自动跟踪泵、数据采集及自动控制系统、毛细管等;试验净围压2 MPa。试验用模拟油83℃下黏度为2.14 mPa·s,模拟地层水矿化度为10 g/L。

为了研究聚合物驱渗流曲线的影响因素,试验设计了5组渗透率,选用 $(23 \sim 70) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的中低渗透贝雷砂岩岩心;设计了3种聚合物体系(分子量900万),配置聚合物的黏度分别为1.6、2.9和5.0 mPa·s。

### 1.2 试验方法与步骤

采用“压差-流量法”和“毛细管平衡法”相结合的试验方法,建立了启动压力梯度驱替测试流程。以压差-流量法为主,测量并绘制渗流速度-压力梯度试验曲线,即渗流曲线(图1中实线def段);以毛

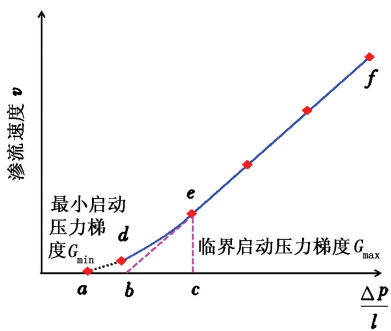


图1 低渗透油藏非达西渗流曲线

Fig.1 Non-darcy seepage characteristics of low permeability reservoirs

细管平衡法为辅,测定流体的最小启动压力梯度( $G_{\min}$ :图1中非达西渗流段的a点)。由此,可以获得完整的渗流曲线adf段。

首先,测渗透率,抽真空饱和水、饱和油,老化,

水驱至残余油状态;其次,注聚合物,测量其最小启动压力、不同稳定注入流量所对应的驱替压差,获得最小启动压力梯度,并绘制渗流曲线;最后,更换岩心或聚合物体系,重复以上步骤。

### 1.3 最小启动压力梯度和临界启动压力梯度

试验测得的最小启动压力梯度和确定的临界启动压力梯度( $G_{\max}$ )结果如表1所示。其中,临界启动压力梯度即流体由非线性段进入线性段所需的驱替压力梯度,采用斜率法确定,即当非线性渗流段的斜率与线性段的斜率相等时对应的压力梯度。

表1 聚合物驱启动压力梯度试验数据

Table 1 Basic parameters of polymer seepage experiments

编号	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	聚合物黏度 $\mu/(\text{mPa} \cdot \text{s})$	$G_{\min}/(\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$	$G_{\max}/(\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$
1	23	1.6	0.00240	0.00996
2	23	2.9	0.00389	0.01545
3	39	1.6	0.00212	0.00624
4	39	2.9	0.00287	0.00872
5	52	1.6	0.00168	0.00516
6	52	2.9	0.00180	0.00579
7	52	5.0	0.00231	0.00794
8	59	1.6	0.00252	0.00703
9	70	1.6	0.00102	0.00240
10	70	2.9	0.00155	0.00434
11	70	5.0	0.00278	0.00628

## 2 聚合物驱渗流曲线影响因素

### 2.1 聚合物黏度

渗透率为 $(23 \sim 70) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储层的聚合物驱具有类似的渗流规律(图2):在相同渗流速度下,聚合物驱的驱替压力梯度远高于水驱,且随着体系黏度的增大,聚合物驱的压力梯度增加,这是由聚合物体系的增黏作用造成的。

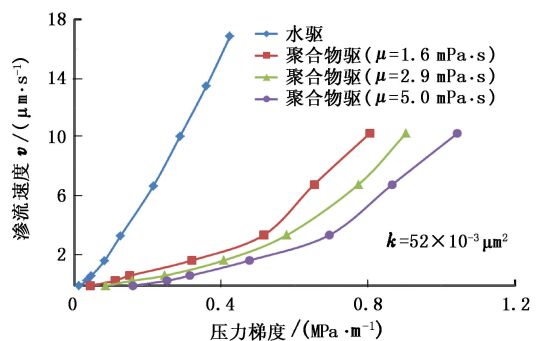


图2 不同体系黏度聚合物驱渗流曲线

Fig.2 Polymer flooding seepage curves

### 2.2 储层渗透率

体系黏度为 $(1.6 \sim 5) \text{mPa} \cdot \text{s}$ 的3种聚合物驱具有类似的渗流规律(图3):相同渗流速度下,随着

储层渗透率降低,聚合物驱的压力梯度变大,而即使渗透率为  $70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,相对于水驱而言,聚合物仍存在较大的启动压力梯度。

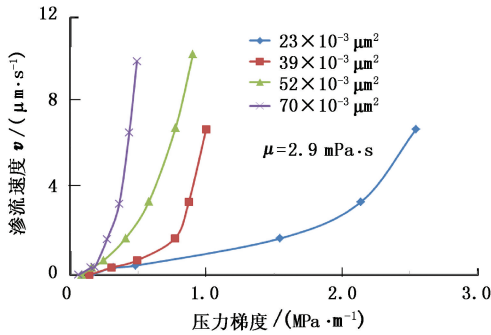


图3 不同储层聚合物驱渗流曲线

Fig.3 Polymer flooding seepage curves

### 3 聚合物驱启动压力梯度量化表征

#### 3.1 非线性表征方法

为了将试验获得的聚合物渗流规律引入到数值模拟中,借鉴低渗透油藏非线性渗流理论与方法<sup>[4]</sup>,通过在达西方程中引入包含非线性表征特性的修正系数  $N$ ,对聚合物驱渗流曲线进行非线性表征。相对于其他方法<sup>[4]</sup>,该方法是基于唯象理论提出的,其优点是能够反映整条渗流曲线特征,包含非达西渗流段和最小启动压力梯度特性。修正的表达式为

$$v = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} N \tag{1}$$

$$N = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha}{\Delta p/L} - \frac{\alpha\beta}{\Delta p/L(\Delta p/L - \beta)}, & \frac{\Delta p}{L} \geq (\alpha + \beta); \\ 0, & \frac{\Delta p}{L} < (\alpha + \beta). \end{cases} \tag{2}$$

$$G_{\min} = \alpha + \beta. \tag{3}$$

式中,  $\Delta p/L$  为压力梯度;  $\alpha, \beta$  为非线性渗流系数,通过拟合渗流曲线获得,  $\alpha > 0, \beta < 0, (\alpha + \beta) \geq 0$ 。

研究表明,利用非线性表征方法拟合渗流曲线的吻合程度较好(相关系数为 0.94 ~ 0.98),可以用其表征聚合物驱渗流曲线特征。

#### 3.2 启动压力梯度非线性表征

##### 3.2.1 非线性渗流系数与体系黏度量化关系

考虑体系黏度的影响,依据式(1)回归得到非线性渗流系数  $\alpha, \beta$ ,由此建立其与体系黏度的关系见图4。以  $k = 52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  为例,随着体系黏度的降低,聚合物驱非线性渗流系数  $\alpha$  减小,且非线性渗流系数  $|\beta|$  也具有类似的规律。同样,在其他储层渗透率下也具有类似的规律。

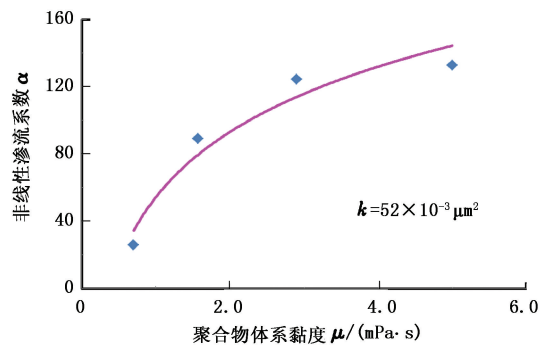


图4 非线性渗流系数与体系黏度关系

Fig.4 Relationship between non-linear seepage coefficient and viscosity

##### 3.2.2 非线性渗流系数与储层渗透率量化关系

考虑储层渗透率的影响,建立了非线性渗流系数  $\alpha, \beta$  与储层渗透率的关系(图5)。研究表明,聚合物体系相同时,随着储层渗透率的降低,聚合物驱非线性渗流系数  $\alpha$  增大;非线性渗流系数  $|\beta|$  也具有类似的规律。

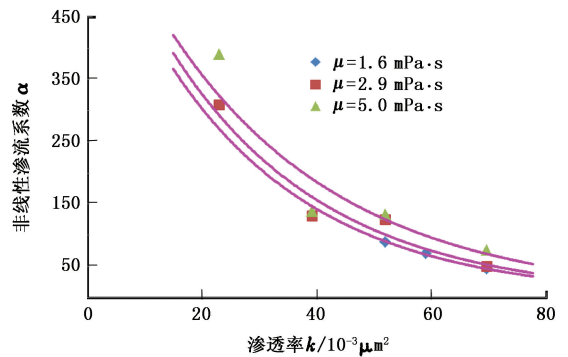


图5 非线性渗流系数与储层渗透率关系

Fig.5 Relationship between non-linear seepage coefficient and permeability

##### 3.2.3 非线性渗流系数与流度量化关系

综合考虑体系黏度和储层渗透率的影响,建立了非线性渗流系数与流度的关系(图6)。研究表明,随着聚合物流度的降低,聚合物驱的非线性渗流系数  $\alpha$  (或  $|\beta|$ ) 均增大。

根据非线性渗流系数与流度的关系曲线,建立了两者之间的幂函数关系,将其作为聚合物驱渗流特性的量化方程。

$$\alpha_p = 893.19 \left( \frac{K_a}{\mu_p} \right)^{-0.62} \tag{4}$$

$$\beta_p = -888.82 \left( \frac{K_a}{\mu_p} \right)^{-0.619} \tag{5}$$

在非线性渗流系数与流度关系曲线(图6)中存在着拐点( $17.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ )。当流度低于此拐点时,随着流度降低,非线性渗流系数迅速增

加,导致聚合物注入困难。根据拐点可以得出,储层渗透率越低,聚合物体系的黏度上限也越低<sup>[5]</sup>;当储层渗透率低于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,聚合物黏度上限接近水的黏度,不再适合聚合物驱。

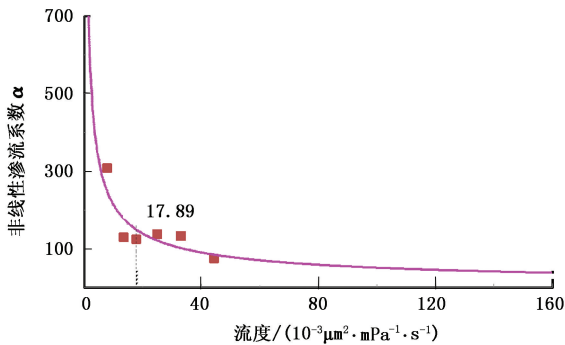


图6 非线性渗流系数与流度关系

Fig. 6 Relationship between non-linear seepage coefficient and mobility

### 3.3 最小启动压力梯度和临界驱替压力梯度确定

根据聚合物驱启动压力梯度试验结果(表1),分别对最小启动压力梯度和临界压力梯度与流度进行回归分析。研究表明,最小启动压力梯度、临界启动压力梯度与流度之间均满足幂函数关系。

最小启动压力梯度与流度关系表示为

$$G_{\min} = 6.5319 \left( \frac{K_a}{\mu_p} \right)^{-0.808} \quad (6)$$

临界启动压力梯度与流度关系表示为

$$G_{\max} = 1.2733 \left( \frac{K_a}{\mu_p} \right)^{-0.625} \quad (7)$$

## 4 低渗透油藏聚合物渗流流态判断

利用式(6)、(7)给出的非线性渗流段最小启动压力梯度和临界压力梯度与流度的关系,同时结合表1的试验数据和低渗透储层聚合物驱黏度上限,可得到聚合物流度界限为 $(2.0 \sim 44.6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ ,由此可在双对数坐标中绘制低渗透油藏聚合物渗流流态判断图版(图7)。

图版分为不流动区、非线性渗流区和拟线性渗流区3部分。图7中两条直线不平行,储层渗透率越大、聚合物体系黏度越小,非线性渗流段越窄。由于受到低渗透储层聚合物驱的适宜渗透率界限及聚合物体系黏度的限制,该图版的流度跨度比单相水驱图版的小<sup>[5-6]</sup>。

在实际油田生产中,当油井以一定产量生产时,从供给边界到井底附近,由于压力梯度逐渐增加,低渗储层的流体也会出现不流动区、非线性渗流区

(不易流动区)和拟线性渗流区(易流动区)3种渗流区域。应用该图版,若已知储层渗透率、驱替介质黏度和驱动压力梯度,可以判断流体在低渗储层中的渗流流态。这3个区域的定量描述,为揭示低渗透油藏聚合物驱的渗流规律提供了依据。

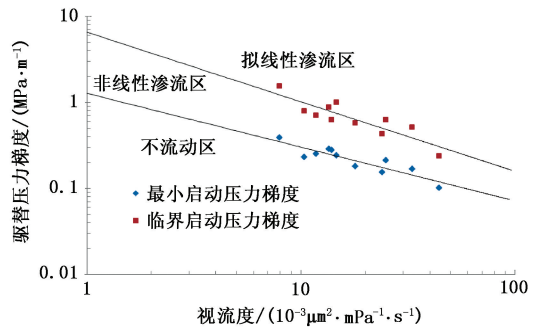


图7 低渗透油藏聚合物驱渗流流态判断图版

Fig. 7 Seepage flow chart of polymer flooding in low permeability reservoirs

## 5 结论

(1)低渗透油藏实施聚合物驱后启动压力梯度影响更突出。在相同渗流速度下,随着储层渗透率的降低或体系黏度增大,聚合物驱的压力梯度均增大,这是由于聚合物的增黏作用造成的。

(2)随着储层渗透率降低、体系黏度增大或流度降低,聚合物驱的最小启动压力梯度、非线性渗流系数均增大,且均大于相同条件下的水驱启动压力梯度。

(3)建立的非线性渗流系数、最小启动压力梯度、临界启动压力梯度与流度的量化关系及绘制的低渗透油藏聚合物渗流流态判断图版为考虑启动压力梯度聚合物驱的数模实现及其流态判定提供了依据。

### 参考文献:

- [1] 丛苏男,杨焯,高岩,等.大港油田聚-表二元复合驱渗流机理研究[J].科学技术与工程,2013,34(13):10292-10294.  
CONG Sunan, YANG Ye, GAO Yan, et al. The study of surface/polymer flooding seepage flow's law in Dagang Oilfield [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 34(13): 10292-10294.
- [2] 吕成远,王建,孙志刚.低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度试验研究[J].石油勘探与开发,2002,29(2):86-89.  
LÜ Chengyuan, WANG Jian, SUN Zhigang. An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in

- low permeability sandstone porous media [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002,29(2):86-89.
- [3] 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):68-70.  
LI Aifen, ZHANG Shaohui, LIU Min, et al. A new method of measuring starting pressure for low permeability reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008,32(1):68-70.
- [4] 姜瑞忠,杨仁锋. 低渗透油藏非线性渗流理论与数值模拟技术[M]. 北京:石油工业出版社,2010:26-42.
- [5] 曹瑞波,丁志红,刘海龙,等. 低渗透油层聚合物驱渗透率界限及驱油效果试验研究[J]. *大庆石油地质与开发*,2005,24(5):71-73.  
CAO Ruibo, DING Zhihong, LIU Hailong, et al. Experimental research on permeability limits and displacement characteristics of polymer flooding in low permeability oil layers[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*,2005,24(5):71-73.
- [6] 孙焕泉,杨勇. 低渗透砂岩油藏开发技术:以胜利油田为例[M]. 北京:石油工业出版社,2008:20-26.
- [7] 彭春洋,欧阳云丽,柯文丽,等. 低渗透油藏渗流启动压力梯度研究[J]. *油气地球物理*,2012,10(1):64-66.  
PENG Chunyang, OUYANG Yunli, KE Wenli, et al. The study of actuating pressure gradient of the fluid flow in low permeable reservoir[J]. *Petroleum Geophysics*, 2012,10(1):64-66.

(编辑 沈玉英)