

窄河道普通稠油油藏见水规律研究

孙强,周海燕,石洪福,王记俊,孔超杰
(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:普通稠油油藏存在启动压力梯度,渗流规律不符合达西定律,常规产水规律理论在普通稠油油藏中难以适用。在考虑非达西渗流规律的基础上,基于流管法和油水两相非活塞式水驱油理论,推导了窄河道普通稠油油藏油井含水率和采出程度的计算公式,分析了油井含水上升规律。结果表明,原油黏度越大,启动压力梯度越大,含水上升速度越快,水驱波及带的宽度越小,采收率越低。根据模型可优化得到窄河道油藏的合理注采参数,对实际油藏开发有一定的指导意义。

关键词:窄河道;普通稠油;启动压力梯度;非活塞式驱替;流管法;产水规律

中图分类号:TE349

文献标识码:A

Research on water production rule of heavy oil reservoirs in narrow channels

Sun Qiang, Zhou Haiyan, Shi Hongfu, Wang Jijun and Kong Chaojie

(Tianjin Branch of CNOOC(China)Co., Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: The start-up pressure gradient existed in the ordinary heavy oil reservoir, the seepage rules could not satisfy the Darcy's rule, and the theory of conventional water production rule was difficult to apply in the ordinary heavy oil reservoirs. On the basis of non-Darcy percolation rule, and the theory of the flow tube method and the oil-water two-phase non-piston water flooding, we derived the calculation formulas of water cut and recovery degree of heavy oil reservoirs in narrow channels, and analyzed the water cut rising rules. The results showed that if the viscosity of crude oil was high, the starting pressure gradient would be great, the rate of water cut would be fast, the width of water sweep zone would be small, and the oil recovery would be low. The reasonable injection and production parameters of narrow channel reservoir could be obtained by the model, which had certain guiding significance for actual reservoir development.

Key words: narrow channel, conventional heavy oil reservoir, start-up pressure gradient, non-piston displacement, stream-tube method, water production rule

渤海油田普通稠油油藏分布广泛,大多进行注水开发。室内物理实验和油田生产实践表明,稠油油藏存在启动压力梯度^[1-2],流动规律表现出非达西渗流特征,常规产水规律理论在普通稠油油藏中难以适用。目前许多专家学者针对面积井网下油井的见水时间和水驱效果进行了研究。计秉玉、唐海、郭粉转等学者运用流管法对不同面积井网形式下的油井见水时间及面积波及系数进行了推导^[3-15],但是研究的油藏流体均为稀油,计算渗流阻力时按单相流体处理,并未考虑油水两相强非活塞性,不适用于油水黏度比较高的普通稠油油藏,且建立的井网为规则的面积井网,不适用于窄河道油藏。

在前人研究的基础上,基于流管法和油水两相非活塞式水驱油理论,建立了考虑稠油启动压力梯度的窄河道油藏流管模型,研究了窄河道普通稠油油藏的见水规律,并优化得到合理注采压差,指导了窄河道油藏的高效开发。

1 模型建立

1.1 假设条件

根据渗流力学理论可将窄河道油藏的渗流看成是两种简单渗流的组合,即注水井和生产井的近井

收稿日期:2018-08-20。

第一作者简介:孙强(1988—),男,助理工程师,油田开发。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)。

区域可以近似视为平面径向流,注水井和生产井中间区域可以视为单向线性流^[6]。

在简化的渗流场基础上建立了窄河道油藏的流管模型(图1)。该模型假设条件如下:①生产井和注水井间注采压差恒定;②不考虑多孔介质及流体的压缩性;③非活塞式水驱油,存在油水两相区;④考虑稠油启动压力梯度。

1.2 流管单元

在窄河道油藏流管模型中取一流管微元,一根流管由AB、BC和CD三段组成(图1)。在流管上任意点 ξ 处,流管的截面积为:

$$A(\xi) = \begin{cases} 2h\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2}, & r_w < \xi < \frac{W}{2} \\ \omega h, & \frac{W}{2} < \xi < \left(\frac{W}{2} + d - W \cos \alpha\right) \\ 2h(W + d - W \cos \alpha - \xi) \tan \frac{\Delta\alpha}{2}, & \\ \left(\frac{W}{2} + d - W \cos \alpha\right) < \xi < (W + d - W \cos \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ξ 为从注水井出发的拟流管的中线长度,m; $A(\xi)$ 为拟流管在 ξ 处的横截面面积, m^2 ; r_w 为井筒半径,m; d 为注采井距,m; W 为河道宽度,m; h 为油层厚度,m; ω 为流管的宽度,m; $\Delta\alpha$ 为注水井和生产井角度增量, $(^\circ)$; α 为注水井和生产井角变量, $(^\circ)$ 。

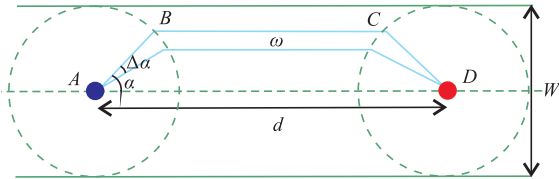


图1 窄河道油藏流管模型

Fig. 1 Flow tube model for narrow channel reservoir

模型中,径向流部分流管长度为: $r_e = \frac{W}{2}$;线性流部分流管长度为: $l = d - 2r_e \cos \alpha$;流管总长度为: $L = l + 2r_e$ 。

1.3 流量方程推导

普通稠油油藏油相渗流方程满足非达西渗流规律:

$$q_o = \begin{cases} -\frac{KK_{ro}}{\mu_o} A(\xi) \text{grad} p \left(1 - \frac{\lambda}{|\text{grad} p|}\right) & |\text{grad} p| > \lambda \\ 0 & |\text{grad} p| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中: q_o 为油相流量, m^3/s ; μ_o 为油相黏度, $mPa \cdot s$; K_o

为油相相对渗透率,无因次; K 为储层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; λ 为稠油启动压力梯度, MPa/m ; $\text{grad} p$ 为压力梯度, MPa/m 。

其中稠油启动压力梯度表达式为^[17]:

$$\lambda = 0.123 \left(\frac{K}{\mu_o} \right)^{-0.8688} \quad (3)$$

水相渗流方程为:

$$q_w = -\frac{KK_{rw}}{\mu_w} A(\xi) \text{grad} p \quad (4)$$

式中: q_w 为水相流量, m^3/s ; μ_w 为水相黏度, $mPa \cdot s$; K_{rw} 为水相相对渗透率, f 。

根据式(2)、(4)和油水连续性方程,当 $|\text{grad} p| > \lambda$ 可得流管见水前的流量表达式:

$$q_i = \frac{K \left[\Delta p - \int_{r_w}^{\xi_i} \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} \lambda \right) / \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right) d\xi - \lambda(L - \xi_i) \right]}{\int_{r_w}^{\xi_i} \frac{d\xi}{A(\xi) \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \int_{\xi_i}^{L-r_w} \frac{d\xi}{A(\xi) \frac{1}{\mu_o}}} \quad (5)$$

式中: Δp 为流管两端的注采压差, MPa ; L 为流管的总长度,m; ξ_i 为拟流管中水驱前缘距离注水井点的距离,m; q_i 为流量, m^3/s 。

流管中渗流阻力为:

$$R = \left[\int_{r_w}^{\xi_i} \frac{d\xi}{A(\xi) \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \int_{\xi_i}^{L-r_w} \frac{d\xi}{A(\xi) \frac{1}{\mu_o}} \right] / K \quad (6)$$

2 含水率与产油量计算

在油水两相区,任一位置 ξ 处的饱和度和水驱前缘位置 ξ_i 可以通过式(1)、(6)确定:

$$\int_{r_w}^{\xi} A(\xi) d\xi = \frac{f'_w(S_w)}{\phi} \int_0^t q_i dt \quad (7)$$

式中: S_w 为含水饱和度, f ; $f'_w(S_w)$ 为含水率, f ; $f'_w(S_w)$ 为含水饱和度 S_w 所对应的含水变化率, f ; t 为驱替时间, s 。

1) 当流管中水驱前缘到达拐点B之前,求得油水前缘位置为:

$$\xi_i = \sqrt{\frac{f'_w(S_w) \int_0^t q_i dt}{\phi h \tan \frac{\Delta\alpha}{2}}} \quad (8)$$

式中: S_w 为前缘含水饱和度, f 。

由式(1)、式(6)和式(8)可得该流管的渗流阻力为:

$$R = \int_{r_w}^{\xi_i} \frac{d\xi}{2hK\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \frac{\mu_o}{2hK \tan \frac{\Delta\alpha}{2}} \ln \frac{r_c}{\xi_i} + \frac{\mu_o l}{K\omega h} + \frac{\mu_o}{2hK \tan \frac{\Delta\alpha}{2}} \ln \frac{r_c}{r_w} \quad (9)$$

2) 当流管中水驱前缘到达拐点B之后、拐点C之前时,求得油水前缘位置为:

$$\xi_i = \frac{W}{2} + \left[\frac{f'_w(S_{wf}) \int_0^t q_1 dt}{\phi} - h \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \left(\frac{W}{2} \right)^2 \right] / (\omega h) \quad (10)$$

由式(1)、式(6)和式(10)可得该流管的渗流阻力为:

$$R = \int_{r_w}^{\xi_i} \frac{d\xi}{2hK\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \int_{\xi_i}^{r_c} \frac{d\xi}{K\omega h \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \frac{\mu_o(l+r_c-\xi_i)}{K\omega h} + \frac{\mu_o}{2hK \tan \frac{\Delta\alpha}{2}} \ln \frac{r_c}{r_w} \quad (11)$$

3) 当流管中水驱前缘到达拐点C之后、生产井之前时,可得油水前缘位置为:

$$\xi_i = W + (d - W \cos \alpha) - \sqrt{\frac{W^2}{2} + \frac{\omega h(d - W \cos \alpha) - \frac{f'_w(S_{wf}) \int_0^t q_1 dt}{\phi}}{h \tan \frac{\Delta\alpha}{2}}} \quad (12)$$

由式(1)、式(6)和式(12)可得该流管的渗流阻力为:

$$R = \int_{r_w}^{\xi_i} \frac{d\xi}{2hK\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \int_{\xi_i}^{r_c} \frac{d\xi}{K\omega h \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \int_{L-\xi_i}^{r_c} \frac{d\xi}{2hK\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \frac{\mu_o}{2hK \tan \frac{\Delta\alpha}{2}} \ln \frac{L-\xi_i}{r_w} \quad (13)$$

4) 当流管中水驱前缘到达油井之后,该流管的渗流阻力为:

$$R = \int_{r_w}^{\xi_i} \frac{d\xi}{2hK\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \int_{\xi_i}^{r_c} \frac{d\xi}{K\omega h \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} + \int_{r_w}^{\xi_i} \frac{d\xi}{2hK\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} \quad (14)$$

根据式(7)可得该流管的出口端饱和度满足:

$$f'_w(S_{wc}) = \left(2h \tan \frac{\Delta\alpha}{2} r_c^2 + \omega h l \right) \phi / \int_0^t q_1 dt \quad (15)$$

式中: S_{wc} 为出口端含水饱和度, f 。

该流管的出口端含水率为:

$$f_{wc} = \frac{K_{rw}(S_{wc})/\mu_w}{K_{ro}(S_{oc})/\mu_o + K_{rw}(S_{wc})/\mu_w} \quad (16)$$

式中: S_{oc} 为出口端含油饱和度, $S_{oc}=1-S_{wc}$ 。

通过计算不同时刻每根流管中的前缘位置,可以算出每根流管的渗流阻力,进而得到计算单元的产液量:

$$Q_L = 0.0864 \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p - \lambda(L_i - \xi_{wi})}{R_i} \quad (17)$$

式中: Q_L 为产液量, m^3/d ; L_i 为第*i*根流管总长度, m ; ξ_{wi} 为第*i*根流管中水驱前缘位置; R_i 为第*i*根流管中渗流阻力, $MPa/(m^3/s)$ 。

产油量:

$$Q_o = 0.0864 \sum_{i=1}^n \left[\frac{\Delta p - \lambda(L_i - \xi_{wi})}{R_i} \times (1 - f_{wci}) \right] \quad (18)$$

式中: Q_o 为产油量, m^3/d ; f_{wci} 为第*i*根流管出口端含水率。

采出程度:

$$R_c = \frac{N_p}{N} \quad (19)$$

式中: R_c 为采出程度; f ; N_p 为累计采油量, m^3 , $N_p = \int_0^T Q_o dt$; N 为原油地质储量, m^3 , $N = Wdh\phi(1 - S_{wc})$ 。

含水率:

$$f_w = 1 - \frac{Q_o}{Q_L} \quad (20)$$

3 见水规律分析

渤海BZ油田为大型窄河道普通稠油油田,以建立的窄河道油藏流管模型为例,结合BZ油田地质油藏参数,对窄河道油藏的见水规律进行了研究。模型的输入参数为:地层水的黏度为0.7 mPa·s,油层厚度为10 m,孔隙度为0.25,注采井距为350 m。模型中考虑了河道的平面非均质性,即渗透率由河道中心向河道边部均匀递减,假定河道中部渗透率为 $3000 \times 10^{-3} \mu m^2$,河道边部渗透率为 $500 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。

3.1 原油黏度对见水规律的影响

当注采压差为20 MPa,河道宽度为200 m时,研究了不同原油黏度对含水上升规律的影响。由式(3)可得原油黏度为100 mPa·s、200 mPa·s、300 mPa·s时,主流线上启动压力梯度分别为0.006 MPa/m、0.012 MPa/m、0.017 MPa/m。图2表示不同原油黏度油藏含水率随采出程度的变化曲线,由图2可知,原油黏度越高,含水上升速度越快,无水采油期短,采收率越低。这是因为原油黏度越高,启动压力梯度

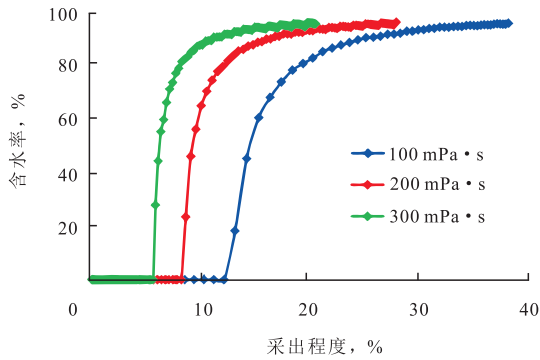


图2 不同黏度油藏含水率随采出程度变化曲线
Fig. 2 Relation between water cut and recovery degree in different viscosity reservoirs

越大,使得水驱过程中需要克服的附加阻力越大,注入水波及的区域越窄,河道边部往往形成死油区,平面水驱波及程度越低,水驱效果差见图3。

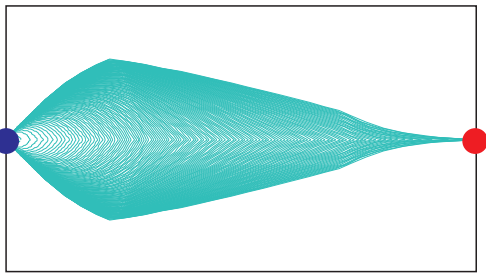


图3 窄河道油藏见水时刻水驱波及示意图
Fig. 3 Schematic diagram of water flooding in narrow channel reservoir during water breakthrough

3.2 注采压差对见水规律的影响

当原油黏度为300 mPa·s,河道宽度为200 m时,研究了不同注采压差对平面波及系数的影响。由式(3)可得主流线上启动压力梯度为0.017 MPa/m。图4可知,增大注采压差可改善水驱开发效果,提高采

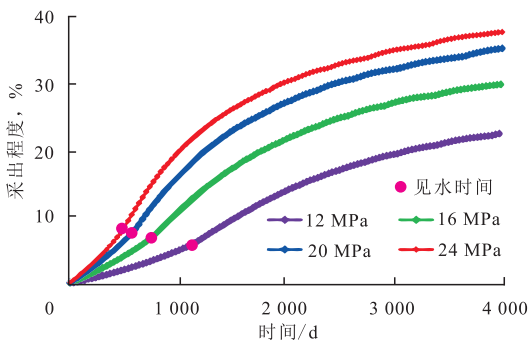


图4 不同注采压差下采出程度变化曲线
Fig. 4 Curves of recovery degree under different injection production pressure difference

收率。生产压差过小会导致河道边部区域无法动用,水驱效果差;而大的生产压差能提高水线突进速度,增加油井见效速度,扩大波及,提高采收率。但过大的生产压差有造成水窜的风险,因此需要制定合理的生产压差。图4可以看出,当注采压差高于20 MPa时,采收程度增幅较小,即当河道宽度为200 m,注采井距为350 m时,注采压差可保持在20 MPa左右。

4 实例应用

利用BZ油田典型井组的生产数据对算法进行了验证。以主力砂体F12井组为例,该井钻遇河道中部,对应注水井为F13井。根据井组的储量、有效厚度、河道宽度、流体特点,以及油田的非均质性资料,对F12井组的采出程度和含水率的关系曲线进行预测,并与实际生产数据进行了对比。图5可以看出,F12井含水上升曲线和理论曲线基本一致,说明利用该方法预测油田相关生产指标具有一定的可靠性。

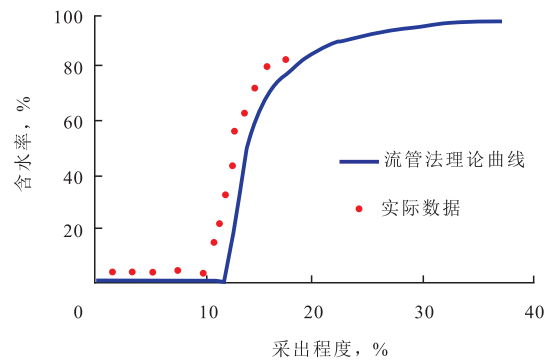


图5 理论与实际生产数据对比
Fig. 5 Comparison of theoretical and actual production data

5 结论

1) 普通稠油油藏受非达西渗流规律的影响,常规产水规律难以适用,基于非达西渗流特征和油水两相非活塞式水驱油理论,建立了窄河道油藏流管模型,得到了窄河道普通稠油油藏产水规律的计算公式。

2) 利用实例分析了启动压力梯度、注采压差对水驱开发效果的影响,通过合理优化注采压差,可以减少死油区,改善开发效果。

(下转第37页)