

◀ 试井与开采 ▶

宾汉流体稠油非稳态渗流时 地层压力分布数学模型及直井产能预测

何勇明¹ 王允诚¹ 姜淑霞² 郭子义³

(1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059; 2. 中原油田勘探开发研究院, 河南濮阳 457001; 3. 青海油田钻采院, 甘肃敦煌 736202)

摘 要: 稠油在地层中的流动具有非牛顿流体特性。将稠油视为宾汉流体, 推导了宾汉流体在非稳态状况时地层孔隙中的压力分布数学模型, 并求得数值解。分析了宾汉流体的启动压力梯度对地层压力分布的影响。基于启动压力梯度, 考虑宾汉流体的运动半径和运动边界压力, 推导了稠油油藏直井的产能预测公式, 给出了运动半径和运动边界压力的确定方法, 并与普通油藏的直井产能预测公式相比较, 结果表明, 稠油的非牛顿流动特性对产能预测结果具有一定的影响。

关键词: 直井; 稠油; 启动压力; 产能预测; 数学模型

中图分类号: TE312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2006) 01-0056-03

稠油在地层中的流动具有非牛顿流体特点, 若将其视为宾汉流体, 那么稠油的流动存在一个启动压力梯度, 前人的研究虽然考虑了启动压力梯度的影响, 但并没有考虑它对油藏的有效流动半径 (即运动半径) 和有效边界压力 (即运动边界压力) 的影响。为此, 笔者推导了宾汉流体稠油在非稳态状况下地层压力分布的数学模型并进行了求解, 考虑启动压力梯度、运动半径和运动边界压力, 推导了宾汉流体稠油油藏垂直井的产能预测模型。

1 压力分布数学模型的建立及数值解

1.1 平面径向流压力分布

宾汉流体的流动特性与牛顿流体类似, 呈一条直线。因此它通过多孔介质的有效渗透率 K_e 与牛顿流体通过多孔介质的渗透率相等, 也就是介质的绝对渗透率。根据公式^[1]:

$$v = -\frac{K}{\mu} \nabla p \left[1 - \frac{G_0}{|\nabla p|} - \frac{1}{3} \frac{G_0}{|\nabla p|} + \frac{1}{3} \left(\frac{G_0}{|\nabla p|} \right)^4 \right] \quad (1)$$

对于非稳态渗流, 有:

$$\frac{1}{|\nabla p|} = H(x, y, z, t) \quad (2)$$

连续性方程: $\nabla(\rho v) = \frac{\phi \mu c}{K} \frac{\partial p}{\partial t}$

$$(1 - G_0 H) \nabla^2 p - G_0 \nabla H \cdot \nabla p = \frac{\phi \mu c}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

对于平面径向流:

$$\nabla H = \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\pm \frac{1}{\partial p / \partial r} \right) = \mu \frac{1}{(\partial p / \partial r)^2} \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \quad (4)$$

$$\frac{1}{|\nabla p|} = H(x, y, z, t) \quad (5)$$

$$\nabla^2 p = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial p}{\partial r} + r \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \right) \quad (6)$$

式 (3)、(4)、(5) 和 (6) 联立解得:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{G_0}{r} = \frac{\phi \mu c}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (7)$$

式 (7) 即为宾汉流体在非稳态情况下, 平面径向流的压力分布表达式。该式非常复杂, 只有通过数值方法进行求解。笔者对单相渗流、外边界定压、内边界定产的条件下的解析解进行了求取。

1.2 平面径向流数学模型

假设在单井泄油区中, 流体为均相且微可压缩, 忽略岩石的可压缩性和流体的重力作用。在单相泄油范围内, 地层均质, 那么其数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) - \frac{G_0}{r} = \frac{\phi \mu c}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \\ p(r, t) \big|_{t=0} = p_i & r_w \leq r \leq r_e \\ p(r, t) \big|_{r=r_w} = p_w \\ p(r, t) \big|_{r=r_e} = p_e \end{cases} \quad (8)$$

对径向坐标采用非等距网格, 将径向非等距网格变换成等距网格系统, 令: $x = \ln(r/r_w)$, 则式 (8) 变为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = G_0 r_w e^x + \frac{\phi \mu c}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \cdot r_w^2 e^{2x} \\ p(x, t) \big|_{t=0} = p_i & 0 \leq x \leq \ln \frac{r_e}{r_w} \\ p(x, t) \big|_{x=0} = p_w \\ p(x, t) \big|_{x=\ln \frac{r_e}{r_w}} = p_e \end{cases} \quad (9)$$

收稿日期: 2005-05-12; 改回日期: 2005-09-21

作者简介: 何勇明 (1973—), 男, 四川平昌人, 2004 年毕业于中国石油大学 (华东) 油气田开发专业, 在读博士研究生。

联系电话: (028) 66161215

采用中心网格系统, 隐式差分格式为:

$$\frac{p_{i-1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} = r_w^2 e^{2i\Delta x} \frac{\phi \mu c}{K} \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} + G_0 r_w e^{i\Delta x} \quad (10)$$

$$p_{i-1}^{n+1} + a p_i^{n+1} + p_{i+1}^{n+1} = d_i \quad (11)$$

其中, $a_i = -2 - \beta_i$; $d_i = -\beta_i p_i^n + G_0 r_w e^{N\Delta x} \Delta x^2$;

$$\beta_i = r_w^2 e^{2i\Delta x} \frac{\phi \mu c}{K} \frac{\Delta x^2}{\Delta t}。$$

假设外边界条件定压、内边界定产, 则:

$$p_{N-2}^{n+1} + a_{N-1} p_{N-1}^{n+1} + p_e = d_{N-1} \quad (12)$$

对内边界条件采用内差分:

$$-p_w + p_1^{n+1} - G_0 (r_e - r_w) = d_0 \quad (13)$$

系数矩阵方程为:

$$\begin{vmatrix} -1 & 1 & & & \\ & 1 & a_1 & 1 & \\ & & \ddots & & \\ & & & 1 & a_{N-2} & 1 \\ & & & & 1 & a_{N-1} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} p_w \\ p_1^{n+1} \\ \vdots \\ p_{N-2}^{n+1} \\ p_{N-1}^{n+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_{N-2} \\ d_{N-1} - p_e \end{vmatrix} \quad (14)$$

1.3 算例分析

某油田地层的各参数为: 泄油半径 $r_e = 200$ m; 边界压力 $p_e = 10.0$ MPa; 井半径 $r_w = 0.12$ m; 油藏厚度 $h = 5.0$ m; 粘度 $\mu = 62$ mPa·s; 渗透率 $K = 0.05$ μm^2 ; 启动压力梯度 $G_0 = (0.015 \sim 0.05)$ MPa/m; 产量 $Q = 15$ m³/d; 节点 $N = 30$ 。

当时间 $t = 30$ d 时, 其压力分布模拟结果见图 1。

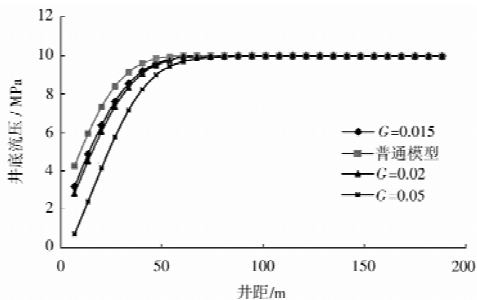


图 1 $t = 30$ d 时压力分布模拟结果

当 $t = 90$ d 时, 其压力分布模拟结果见图 2。

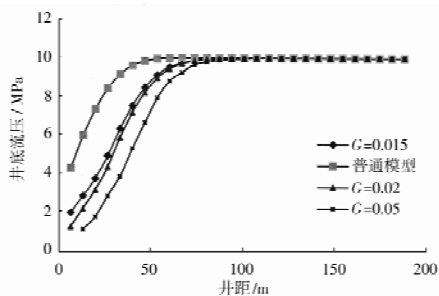


图 2 $t = 90$ d 时压力分布模拟结果

由图 1、图 2 可以看出: 在定产量、定外边界压

力条件下, 相同井距处, 启动压力梯度越大 (非牛顿性越强), 所需井底流压越小, 即所需生产压差越大。启动压力梯度相同时, 生产时间越长, 其所需井底流压越小, 所需生产压差越大。这符合稠油的非牛顿性流动规律。

2 直井产能预测

2.1 产能预测模型

宾汉流体的流动存在一个启动压力梯度, 当流体的压力梯度小于启动压力梯度时, 流体不流动。假设圆形地层中有一口生产井, 那么其压力梯度的分布表现为: 越靠近边缘, 压力梯度越小。因此, 在地层的某处 (r_m) 总存在一个压力梯度, 其值等于流体的启动压力梯度。超出 r_m 范围的流体其压力梯度小于启动压力梯度, 流体不流动。在此称这个 r_m 为“运动半径” (如图 3), r_m 所对应的压力称为“运动边界压力”。因此, 在使用宾汉流体产能预测公式时, 计算中的“边界半径”不能用油藏边界半径, 只能用运动半径, “边界压力”不能用油藏边界压力, 而只能用运动边界压力。

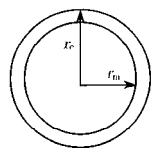


图 3 运动边界示意图

对于平面径向流, 假设圆形定压边界地层中心一口生产井。根据文献^[2], 宾汉流体直井产能预测公式为:

$$Q = \frac{2\pi k h [(p_m - p_w) - G_0 (r_m - r_w)]}{\mu B \ln \left(\frac{r_m}{r_w} \right)} \quad (15)$$

文献^[2]中所用到的确定运动边界半径和边界压力的方法不实用, 必须通过实验室来确定流体的屈服应力, 这在实际应用中很不方便, 也不现实。下面笔者通过计算实例介绍一种更为实用的确定运动边界半径和边界压力的新方法。

2.2 算例分析

某油田地层的各参数为: 泄油半径 $r_e = 200$ m; 边界压力 $p_e = 10.00$ MPa; 井底压力 $p_w = 3.00$ MPa; 井半径 $r_w = 0.12$ m; 油藏厚度 $h = 15.00$ m; 塑性粘度 $\mu = 62$ mPa·s; 渗透率 $K = 0.05$ μm^2 ; 启动压力梯度 $G_0 = 0.015$ MPa/m; $B = 1.1$ 。

该油田地层压力分布计算结果见表 1。

整个油藏泄油半径为 200 m, 将其分为 30 个空间点, 则每个空间点的步长为:

$$r_i = \frac{r_e}{N} = \frac{200}{30} = 6.7 \text{ m},$$

表 1 某油田地层压力计算结果

时间/d	压力/MPa												
	6.7 ^①	13.4 ^①	20.1 ^①	26.8 ^①	33.5 ^①	40.2 ^①	46.9 ^①	53.6 ^①	60.3 ^①	67.0 ^①	73.7 ^①	80.4 ^①	87.1 ^① 93.8~201 ^①
1	8.22	8.64	9.33	9.98	9.99	9.99	10.00						
5	6.40	8.39	9.37	9.77	9.84	9.96	9.98	9.99	9.99	10.00			
10	5.69	7.59	8.80	9.46	9.77	9.90	9.95	9.97	9.98	9.99	9.99	10.00	
30								9.90	9.95	9.97	9.98	9.99	9.99 10.00

注：①为运动半径，m。

生产 1、5、10 和 30 d 时的运动半径分别为：

$r_{m1}=3r_i=20.1\text{ m};$

$r_{m5}=5r_i=33.5\text{ m};$

$r_{m10}=6r_i=40.2\text{ m};$

$r_{m30}=8r_i=53.6\text{ m}.$

产量计算结果见表 2。

表 2 某油田稠油油藏产量计算结果

时间/d	1	5	10	30
运动边界压力/MPa	9.33	9.84	9.90	9.90
运动半径/m	20.1	33.5	40.2	53.6
产量/m ³ ·d ⁻¹	6.93	6.23	5.86	5.52

在其它参数不变的情况下，根据牛顿型流体稠油油藏的直井产能公式^[3]：

$$Q=\frac{2\pi kh}{\mu B\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}\left(p_e-p_w\right),\tag{16}$$

式（16）的计算结果为 7.52 m³/d。

由此可见，考虑运动半径和没有考虑运动半径的计算结果有一定的差别。这主要是因为运动半径和运动边界压力造成的。随着生产时间的延长，两者之间的差别也就越大。由此可见，启动压力梯度对稠油油藏的产能预测有一定的影响。

3 结 论

1) 建立了宾汉流体型稠油油藏在非稳态渗流时的压力分布数学模型，并采用隐式差分格式对其求出了数值解。分别计算了生产 30 d 和 90 d 的压力分布，

结果表明，没有考虑启动压力梯度时的压力分布与时间无关，但考虑了启动压力梯度的压力分布随时间的不同而不同，说明启动压力对稠油油藏的压力分布有很明显的影响。

2) 考虑启动压力梯度、运动半径和运动边界压力，推导了宾汉流体稠油油藏直井的产能预测模型，并与普通油藏的产能预测公式相比较，结果表明，启动压力、运动半径和运动边界压力对产能的预测有明显的影

响。3) 通过算例计算，笔者给出的运动半径和运动边界压力确定的新方法更加实用。

符号说明

r_m 为运动边界半径，m； r_e 为油藏边界半径，m； r_w 为井眼半径，m； p_e 为油藏边界压力，MPa； p_m 为运动边界压力，MPa； p_w 为井底压力，MPa； μ 为粘度，mPa·s； K 为渗透率， μm^2 ； h 为油藏厚度，m； G_0 为启动压力梯度，MPa/m； Q 为产量，m³/d； t 为时间，d； ϕ 为孔隙度； c 为压缩系数； B 为体积系数。

参 考 文 献

[1] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 北京：中国科学技术大学出版社，1999.
[2] 何勇明，李爱芬，陶军，等，塑性流体型稠油油藏垂直井产能预测公式 [J]. 油气地质与采收率，2003，10（5）：55-57.
[3] 张建国. 渗透流体力学 [M]. 山东东营：石油大学出版社，1994.

[审稿 吴晓东]

A Mathematical Model of Stratum Pressure Distribution in Heavy-Oil Reservoir with Non-Steady State Bingham Fluid and Productivity Prediction in Vertical Wells

He Yongming¹ Wang Yuncheng¹ Jiang Shuxia² Guo Ziyi³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China; 2. Exploration & Deverlopment Research Institute, Zhongyuan Oilfield, Puyang, Henan, 457001, China; 3. Drilling and Production Institute, Qinghai Oilfield, Dunhuang, Gansu, 736202, China)

Abstract: When flowing in the formation heavy oil always reveals non-Newton rheological behavior. Assuming heavy oil as Bingham fluid, a mathematic model of non-steady pressure distribution of Bingham fluid in formation pores is derived, and its numerical solution is obtained. In addition, the effect of startup pressure gradient of Bingham fluid in stratum pressure distribution are analyzed. Based on the startup pressure gradient and accounting for aspects of moving radius and moving boundary pressures, productivity prediction equations of heavy oil reservoirs in vertical wells are derived, methods for calculating moving radius and moving boundary pressures are presented also. Comparisons of the productivity-prediction equations with conventional vertical well ones show that non-Newton flow behavior of heavy oil affects productivity prediction to a certain extent.

Key words: straight well; viscous crude oil; starting pressure; productivity forecast; mathematical model