

考虑启动压力梯度的低渗气藏水平井产能计算^{*}

高海红¹ 程林松² 冯儒勇³

(1.中国石化国际石油勘探开发有限公司 2.中国石油大学·北京 3.中海石油研究中心)

高海红等.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.

摘要 低渗透气藏的开发在石油工业中占据着重要的地位,水平井因其特有的增产优势而广泛应用于开发低渗透气藏。水平井的成本投入较高,准确预测其产能可为水平井的钻井和采油工程方案设计提供科学的依据。低渗气藏水平井的产能预测大多忽略了低渗气藏的启动压力梯度效应,使预测产能与投产后的实际产能相差很大。在 Joshi 水平井渗流理论基础上,以上下边界封闭的低渗透气田为例,推导了考虑启动压力梯度的低渗气藏水平井的产能计算公式,引入无因次参数 s 表征启动压力梯度引起的产能损失程度。矿场资料验证了产能公式的计算精度,并分析了启动压力梯度对气井产能的影响趋势,结果表明随着启动压力梯度的增加,其损失的气量呈线性增加。这为水平井开发低渗透气藏提供了理论支持。

主题词 低渗透油气藏 水平井 生产能力 启动压力 非达西流

对低渗气藏的开发而言,B.A.弗洛林提出的启动压力梯度的概念已经成为热点^[1]。但是,研究者往往强调的是低渗气藏中存在气体滑脱效应^[2],忽视了低渗气藏与低渗油藏一样也存在启动压力梯度问题^[3-5]。文献[6]给出了低渗气藏存在启动压力梯度的实验,证明了在更低速的条件下低渗气藏同样也存在启动压力梯度问题。随着水平井钻井技术的成熟,其特有的增产优势使水平井开发低渗透气藏得到广泛应用,部分学者对气藏水平井产能公式进行了有益的探索,分别建立了相应的产能计算模型^[7-8],并在现场取得了一定的应用效果。但对于低渗气藏水平井的产能预测均没有考虑启动压力梯度问题,导致预测的产能与实际产能差异较大,这给水平井的钻井设计和采油工程设计带来了困难。

一、启动压力梯度

对于低渗条件下的渗流,压力梯度大的部分表现为达西流,压力梯度小的部分表现为非达西流。即低渗油气田具有启动压力梯度,在流速与压差关系图上直线段延长线与压差坐标轴相交处不为零。宏观上可理解为:实际压差只有大于某一临界值时,流体才能流动,这个临界值称为启动压力梯度。非达西渗流规律可用下式描述:

$$\begin{cases} v = -\frac{k}{\mu} \left(1 - \lambda / \left| \frac{\partial p}{\partial l} \right| \right) \cdot \frac{\partial p}{\partial l} & \left| \frac{\partial p}{\partial l} \right| > \lambda \\ v = 0 & \left| \frac{\partial p}{\partial l} \right| \leq \lambda \end{cases} \quad (1)$$

二、水平井产能公式推导

国内外学者对水平井产能进行了较多研究,比较典型的是 Joshi 公式。Joshi^[9]将水平井的三维渗流问题简化为两个相互关联的二维渗流问题,即水平井水平面和垂直面内的渗流问题,分别计算两部分泄油区域的流量,利用等值渗流阻力法导出产能公式。笔者以上、下边界封闭的低渗透气田为例,从水平气井的产能推导出发,引入启动压力梯度,得出考虑启动压力梯度的低渗气藏水平井产能公式。

1. 物理模型

如图1所示,顶、底边界不渗透、水平方向无限延伸、四周无边界的无限大均质各向同性气藏。假设水平井位于油气藏中央,水平井的长度为 L ,油气藏厚度为 h ,流体的流动为弱可压缩气体的单相渗流,符合低速非达西渗流定律,忽略了重力和毛细管力的影响。

2. 产能公式的推导

(1) 水平井水平面的流量计算

^{*} 本文受到国家自然科学基金项目“西部深层变形介质复杂油气非线性渗流模型”(编号:90210019)的资助。

作者简介:高海红,女,1975年生,工程师,博士;主要从事油气藏工程与油气藏渗流理论的研究工作。地址:(100083)北京市海淀区北四环中路263号北航科技园世宁大厦506室。电话:13466567615。E-mail:haihonggao2004@163.com

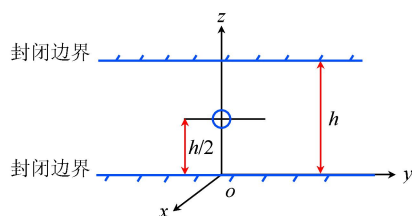


图1 上、下封闭边界气藏水平井示意图

水平井的水平泄油面积呈椭圆形,引入茹科夫斯基函数 $\frac{z}{L/2} = \frac{1}{2} \left(\omega + \frac{1}{\omega} \right)$, 利用保角变换将长半轴为 a 、短半轴为 b 的椭圆形区域变换成半径为 $\frac{a+b}{L/2}$ 的圆形区域, 将线段 $(-L/2, 0)$ 到 $(+L/2, 0)$ 映像成单位圆周 (见图2)。在 ω 平面上的流动, 可以认为是半径为 $\frac{a+b}{L/2}$ 的圆形供给区域内一口半径为 1 的直井。

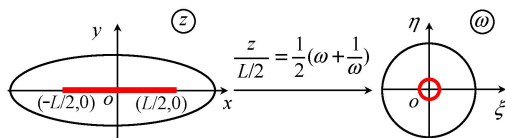


图2 水平面保角变换关系图

考虑启动压力梯度时:

$$v = \frac{Q}{\pi r h} = K \alpha \frac{2p}{\mu Z} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - \lambda \right) \quad (2)$$

其中: $\alpha = \frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} T} \quad (3)$

引入拟压力的概念:

$$m(p) = \int \frac{2p}{\mu Z} dp \quad (4)$$

对式(4)从 (r_w, p_w) 到 (r_e, p_e) 进行积分:

$$m(p_e) - m(p_w) = \frac{\mu Q}{\pi \alpha K h} \ln \frac{r_e}{r_w} + \lambda (r_e - r_w) \quad (5)$$

考虑到椭圆性质 $b = \sqrt{a^2 - (L/2)^2}$, 水平气井在水平面的流量为:

$$Q_h = \frac{\pi \alpha K h \left[m(p_e) - m(p_w) - \lambda \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} - 1 \right] \right]}{\ln \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right]} \quad (6)$$

其中: $a = \left(\frac{L}{2} \right) \left[\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(2 \frac{r_e}{L} \right)^4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$

(2) 水平井垂直面的流量计算

水平井在垂直面的流动相当于顶、底供给边界油田中的一个汇点 (见图3)。

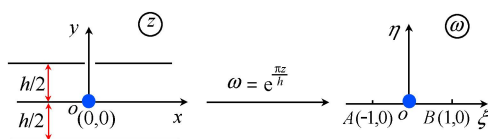


图3 垂直面保角变换图

将 z 平面上带形区域 $(-h/2 < y < h/2)$ 变换成 ω 平面上的一个单位圆域。 z 平面上汇点 $(0, 0)$ 在 ω 平面上变成 B 点 $(1, 0)$, z 平面上的井半径 r_w 在 ω 平面上变为 ρ_w 。

$$\rho_w = \left| \frac{d(\omega - 1)(\omega + 1)}{dz} \right|_{(0,0)} r_w = \left| \frac{2\pi e^{\frac{\pi z}{h}}}{dz} \right|_{(0,0)} r_w = \frac{2\pi r_w}{h} \quad (8)$$

ω 平面上的流动, 可以认为是单位圆形供给区域内一口半径为 ρ_w 的直井, 因此水平气井在垂直平面的流量为:

$$Q_v = \frac{\pi \alpha K L \left[m(p_e) - m(p_w) - \lambda \left(1 - \frac{2\pi r_w}{h} \right) \right]}{\ln \left(\frac{2\pi r_w}{h} \right)} \quad (9)$$

(3) 水平气井的产能公式

由式(6)和式(9)得水平方向和垂直方向气体渗流阻力分别为:

$$\Omega = \frac{1}{\pi \alpha K h} \ln \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right] \quad (10)$$

$$\Omega = \frac{1}{\pi \alpha K L} \ln \left(\frac{h}{2\pi r_w} \right) \quad (11)$$

根据等值渗流阻力法 $Q = (p_e - p_w) / (\Omega + \Omega)$, 水平气井的产能公式为:

$$Q = \frac{m(p_e) - m(p_w) - \lambda \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} - 1 \right] - \lambda \left(1 - \frac{2\pi r_w}{h} \right)}{\Omega + \Omega} \quad (12)$$

将式(10)、(11)代入式(12)得:

$$Q = \frac{\pi \alpha K h \left[m(p_e) - m(p_w) \right] (1 - \lambda')}{\ln \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right] + \frac{h}{L} \ln \left(\frac{h}{2\pi r_w} \right)} \quad (13)$$

其中: $\lambda' = \frac{\left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{2\pi r_w}{h} \right] \lambda}{m(p_e) - m(p_w)} \quad (14)$

利用拟压力可以严格地表示气井的产能方程式, 但计算比较繁琐。根据理论研究, 当压力小于 14 MPa 时, μZ 基本为常数, 式(13)可变为:

$$Q = \frac{\pi a K h (p_e^2 - p_w^2) (1 - \lambda') / (\mu Z)}{\ln \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right] + \frac{h}{L} \ln \left(\frac{h}{2\pi r_w} \right)} \quad (15)$$

当压力大于 21 MPa 时, $\frac{p}{\mu Z}$ 为常数, 式(13)可变为:

$$Q = \frac{2\pi a K h (p_e - p_w) (1 - \lambda') / (\mu Z)}{\ln \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right] + \frac{h}{L} \ln \left(\frac{h}{2\pi r_w} \right)} \quad (16)$$

三、实际算例

某气藏的地层参数和生产井部分参数如下: 气层厚度为 5 m, 温度为 80 °C, 地层平均渗透率为 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 水平井的泄油半径为 900 m, 井筒半径为 0.06 m, 井筒长度为 300 m。气体黏度为 0.025 mPa·s, 原始地层压力为 30 MPa, 井底流压为 26 MPa, 启动压力梯度为 0.02 MPa/m。不考虑启动压力梯度的产能为 $7.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 利用式(16)计算的产能为 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 该气井的实际产能为 $5.55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 相对误差在 10% 以内, 完全达到现场要求的精度。

四、启动压力梯度对产能的影响分析

为分析启动压力梯度对水平井产能的影响, 定义无因次参数 $s = (\text{不考虑启动压力梯度的水平气井产能} - \text{考虑启动压力梯度的水平气井产能}) / \text{不考虑启动压力梯度的水平气井产能}$ 。即 s 表征了启动压力梯度引起的气体产量损失程度:

$$s = \frac{\left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{2\pi r_w}{h} \right] \lambda}{p_e - p_w} \quad (17)$$

以算例中的数据为例, 当启动压力梯度分别取 0、0.01、0.05、0.1、0.2 MPa/m 时, 启动压力梯度与无因次参数 s 的关系曲线如图 4 所示。

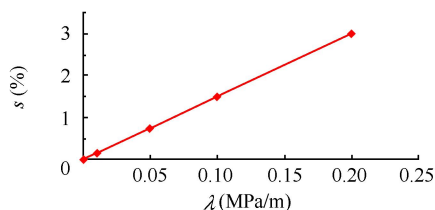


图4 启动压力梯度—无因次参数关系曲线

由图 4 可看出, 启动压力梯度与无因次参数 s 呈明显的线性关系, 当启动压力梯度较小时, 对水平气井产能的影响很小, 随启动压力梯度的增加, 到 0.2 MPa/m 时, 产量损失达到 60%, 因此启动压力

梯度是影响低渗透气藏水平井产能的重要因素。如果不考虑启动压力梯度, 将导致预测的水平气井产能偏高, 使水平井的方案设计失败。

五、结 论

(1) 低渗气藏存在启动压力梯度是不容忽视的客观事实, 随启动压力梯度的增加, 损失的产能呈线性增加。

(2) 对于其他如 Giger、Babu、Renard 等水平井产能公式也可以做类似的考虑启动压力梯度的修正, 使之适用于低渗气藏水平井的产能预测。

(3) 公式的修正只考虑了低渗透气藏中的启动压力梯度效应, 实际应用中要判断气藏中滑脱效应和启动压力梯度效应何者占据主要地位。

符 号 说 明

a 为椭圆长半轴, m; b 为椭圆短半轴, m; h 为气层厚度, m; L 为水平井段长度, m; K 为气藏平均渗透率, m^2 ; Q 为气井产量, m^3/s ; p_e 为油气藏边界压力, Pa; p_w 为井底流压, Pa; r_w 为水平井筒半径, m; r_e 为水平井泄油半径, m; T 为温度, K; v 为渗流速度, m^3/s ; Z 为气体偏差系数; μ 为气体黏度, Pa·s; λ 启动压力梯度, Pa/m。

参 考 文 献

- [1] 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与进展[J]. 石油勘探与开发, 1986, 18(4): 76-80.
- [2] 王茜, 张烈辉, 钱治家, 等. 考虑科林贝尔效应的低渗、特低渗气藏数学模型[J]. 天然气工业, 2003, 23(6): 100-102.
- [3] 吴凡, 孙黎娟, 乔国安, 等. 气体渗流特征及启动压力规律的研究[J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 82-84.
- [4] 郝斐, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏启动压力梯度研究[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 29-32.
- [5] 李晓平, 刘启国, 赵必荣. 水平气井产能影响因素分析[J]. 天然气工业, 1998, 18(2): 53-56.
- [6] 宋付权, 刘慈群, 李捷. 启动压力梯度的室内简便测量[J]. 低渗透油气田, 1999, 4(4): 48-50.
- [7] 刘想平. 气藏水平井稳态产能计算新模型[J]. 天然气工业, 1998, 18(1): 37-40.
- [8] 何凯. 气井产能评价资料在水平井优化设计中的应用[J]. 天然气工业, 2003, 23(增刊): 118-119.
- [9] JOSHI S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(6): 729-739.

(修改回稿日期 2008-01-16 编辑 韩晓渝)