

考虑真实气体 PVT 动态的高速非达西渗流模型

赵晓燕 姚 军 崔传智 苏玉亮

(中国石油大学(华东)石油工程学院 山东 东营 257061)

摘 要:在分析天然气高速非达西渗流特征的基础上,考虑了天然气黏度、压缩因子和压缩系数等随压力变化的情况,建立了天然气高度非线性的不稳定渗流数学模型,采用数值差分方法对模型进行了求解,并分析了非达西渗流条件下气体产能特征,以及真实气体 PVT 参数随压力变化对产能的影响。结果表明,考虑高速非达西流和真实气体 PVT 参数动态变化时的产能高于达西线性流和 PVT 参数为常数时的产能,在不稳定渗流的早期、晚期阶段,天然气黏度、压缩系数变化都会对产能产生影响。因此在气藏产能计算和动态分析中应该考虑非达西流和 PVT 系数变化对产能的影响,以准确指导气藏开发。

关键词:非达西流;真实气体;PVT 参数;渗流模型;生产能力

中图分类号:TE312 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2009)02-0078-04

与一般液体渗流规律不同,气体在渗流过程中不是达西线性流。由于气体黏度低,流动性好,其流动规律一般符合高速非达西渗流规律,同时气体高压物性参数与压力高度相关,在动态分析和产能计算中不能视为常数,导致气体渗流模型是高度非线性的,难以用解析法求解。对于气体的不稳定非线性渗流模型,目前多采用近似解法,线性化求解,而这些解法通常假定气体流动满足达西线性渗流定律^[1-4],忽略了真实气体 PVT 的变化,认为天然气的等温压缩系数、黏度和压缩因子等高压物性参数为常数^[5]。因此,笔者建立了考虑高速非达西流和真实气体 PVT 参数变化的数学模型,采用数值差分方法对模型进行了求解,分析了非达西流动以及真实气体 PVT 参数变化对气藏产能的影响,为气藏动态分析和产能计算提供了理论参考。

1 真实气体高速非达西渗流模型

基本假设:1)气体渗流为等温过程;2)天然气为真实气体,黏度、密度、压缩因子和压缩系数等随压力变化;3)气体流动为高速非达西渗流。

1.1 运动方程

气体的高速非达西渗流用 Forchheime 方程描述^[6]:

$$-\text{grad}p = \frac{\mu}{K}v + \beta\rho|v|v \quad (1)$$

式中, p 为地层压力,MPa; K 为渗透率, μm^2 ; μ 为天然气黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; v 为渗流速度, cm/s ; β 为高速速度系数, $1/\text{cm}$, $\beta = 7.644 \times 10^{10}/K^{1.5[7]}$; ρ 为天然气密度, g/cm^3 。

1.2 状态方程

天然气的状态方程为:

$$\rho = \frac{p\gamma_g M_a}{ZRT} \quad (2)$$

式中, T 为地层温度,K; γ_g 为天然气相对密度; M_a 为空气摩尔质量, g/mol ; Z 为天然气压缩因子。

天然气等温压缩系数方程为:

$$C(p) = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \frac{\text{d}Z}{\text{d}p} \quad (3)$$

式中, C 为天然气压缩系数。

1.3 连续性方程

气体不稳定渗流的连续性方程为:

收稿日期:2008-09-08;改回日期:2009-01-190078-04

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973 计划”)项目“注 CO₂ 提高原油采收率的多相组分相态理论”(编号:2006CB705804)资助

作者简介:赵晓燕(1971—),女,黑龙江巴彦人,1993 年毕业于石油大学(华东)油藏工程专业,在读博士研究生,高级工程师,主要研究方向为油气田开发工程。

联系电话:(0546)7878515

$$-\operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = \phi \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (4)$$

式中, ϕ 为孔隙度, 小数。

将式(1)、(2)代入式(4)整理得:

$$\nabla \left[F \frac{p}{\mu Z} \nabla p \right] = \frac{\phi \mu C}{K} \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

其中非达西系数 F 为:

$$F = \frac{1}{1 + \beta \rho \frac{K}{\mu} |v|} \quad (6)$$

定义压力函数:

$$\bar{p} = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp \quad (7)$$

可得:

$$\nabla [F \nabla \bar{p}] = \frac{\phi \mu C}{K} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \quad (8)$$

式中, \bar{p} 为拟压力, $\text{MPa}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。

在一维径向渗流情况下, 式(8)可写为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r F \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \right) = \frac{\phi \mu C}{K} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \quad (9)$$

式(8)、(9)为真实气体不稳定等温渗流的综合微分方程, 考虑了非达西流动以及天然气黏度、压缩因子和压缩系数等随压力的变化, 是高度非线性的不稳定渗流方程。

2 天然气 PVT 参数计算模型

天然气压缩因子计算方法采用 Dranchuk 等人通过拟合 SK 图版提出的方程^[8]:

$$Z = 1 + (A_1 + A_2/T_{\text{pr}} + A_3/T_{\text{pr}}^3) \rho_{\text{pr}} + (A_4 + A_5/T_{\text{pr}}) \rho_{\text{pr}}^2 + A_5 A_6 \rho_{\text{pr}}^5 / T_{\text{pr}} + A_7 \rho_{\text{pr}}^2 / T_{\text{pr}}^3 (1 + A_8 \rho_{\text{pr}}^2) \exp(-A_8 \rho_{\text{pr}}^2) \quad (10)$$

式中, $\rho_{\text{pr}} = 0.27 p_{\text{pr}} / (Z T_{\text{pr}})$; T_{pr} 为对应温度; p_{pr} 为对应压力; $A_1 = 0.315\ 062\ 37$; $A_2 = -1.046\ 709\ 90$; $A_3 = -0.578\ 327\ 29$; $A_4 = 0.535\ 307\ 71$; $A_5 = -0.612\ 320\ 32$; $A_6 = -0.104\ 888\ 13$; $A_7 = 0.681\ 570\ 01$; $A_8 = 0.684\ 465\ 49$ 。

高压下天然气黏度的计算采用 Lee 关系式^[8]:

$$\mu_{\text{g}} = 10^{-4} B \exp(X \rho_{\text{g}}^Y) \quad (11)$$

式中, $Y = 0.2(12 - X)$; $\rho_{\text{g}} = \frac{0.028\ 97 \gamma_{\text{g}} p}{Z R T}$; $B = \frac{2.683\ 2 \times 10^{-2} (470 + M_{\text{g}}) T^{1.5}}{116.111\ 1 + 10.555\ 6 M_{\text{g}} + T}$; M_{g} 为天然气摩尔质量, g/mol ; $X = 0.01 \left(350 + \frac{54\ 777.78}{T} + M_{\text{g}} \right)$ 。

3 模型求解

为分析高速非达西流和真实气体 PVT 参数变化对产能的影响, 笔者采用数值差分法对圆形封闭地层中心一口井定井底流压的情况进行了求解, 并编制了计算程序。

考虑到井底附近 r_i 很小时, $\frac{1}{r_i}$ 很大, 计算时可能出现不稳定的情况, 将一维问题的柱坐标转换成直角坐标。

令 $r = R_w e^x$, 即 $x = \ln\left(\frac{r}{R_w}\right)$, 将其代入式(9), 整理后得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) = R_w^2 e^{2x} \frac{\phi \mu C}{K} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \quad (12)$$

式中, R_w 为井径, cm 。

直角坐标下区域离散时采用等步长离散, 即 $\Delta x_i = \Delta x_{i+1} = \Delta x_{i-1} = \Delta x$, 则 $x_i = i \Delta x$ 。

对式(12)采用时间向后, 空间中心差分的方法得隐式差分方程:

$$F_{i+1}^n \bar{p}_{i+1}^{n+1} - (F_{i+1}^n + F_i^n + M_i) \bar{p}_i^{n+1} + F_{i-1}^n \bar{p}_{i-1}^{n+1} = M_i \bar{p}_i^n \quad (13)$$

其中, $M_i = R_w^2 e^{2i\Delta x} \frac{\phi}{K} \mu_i^n C_i^n \frac{\Delta x^2}{\Delta t_i}$ 。

差分方程(13)为三对角矩阵方程, 采用追赶法求解。

采用数值积分方法计算压力函数, 其计算公式为:

$$\begin{aligned} \bar{p} &= 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2p}{\mu Z} \right)_i + \left(\frac{2p}{\mu Z} \right)_{i-1} \right] (p_i - p_{i-1}) \end{aligned} \quad (14)$$

通常取 $p_0 = 0\ \text{MPa}$ 。

4 结果分析

4.1 天然气 PVT 参数的计算

已知一天然气藏, 天然气相对密度 γ_{g} 为 0.6, 临界压力 p_{pc} 为 4.62 MPa, 临界温度 T_{pc} 为 200 K, 气藏温度 T 为 395 K, 计算压缩因子、黏度和压缩系数及 PVT 参数变化下的拟压力, 结果见表 1。

4.2 高速非达西流对产能的影响

气体 PVT 参数不变, 选取原始地层压力为 30

表 1 天然气物性参数及拟压力计算结果				
压力/ MPa	压缩因子	黏度/ mPa·s	压缩系数/ MPa ⁻¹	拟压力/ MPa ² ·(mPa·s) ⁻¹
2.5	0.979 9	0.015 0	—	426.0
5.0	0.962 9	0.015 3	0.207 1	1 700.4
7.5	0.949 4	0.015 7	0.139 0	3 806.8
10.0	0.939 9	0.016 2	0.104 0	6 703.6
12.5	0.934 6	0.016 8	0.082 3	10 331.5
15.0	0.933 6	0.017 4	0.067 1	14 623.8
17.5	0.936 8	0.018 1	0.055 8	19 502.9
20.0	0.943 7	0.018 9	0.047 1	24 889.6
22.5	0.953 9	0.019 6	0.040 2	30 708.9
25.0	0.967 1	0.020 4	0.034 5	36 890.2
27.5	0.982 8	0.021 1	0.030 0	43 378.1
30.0	1.000 5	0.021 9	0.026 3	50 113.2

MPa 情况下的数值,井底流压保持 15 MPa,计算高速非达西流和达西线性流下的产能变化规律,其中无因次产量、无因次时间^[9]为:

$$Q_D = \frac{Q_{sc} p_{sc} T}{Kh (\bar{p}_i - \bar{p}_{wf}) T_{sc}} \tag{15}$$

$$t_D = \frac{Kt}{\phi \mu_i C_i R_w^2} \tag{16}$$

式中, p_{sc} 为标准状况下的压力,MPa; T_{sc} 为标准状况下的温度,K; h 为地层厚度,cm;

图 1 为高速非达西流和达西线性流的无因次产量与无因次时间的关系曲线。由图 1 可看出,高速非达西流的产能高于达西线性流的产能,并且高速非达西流条件下气井具有相对较长的稳定期。

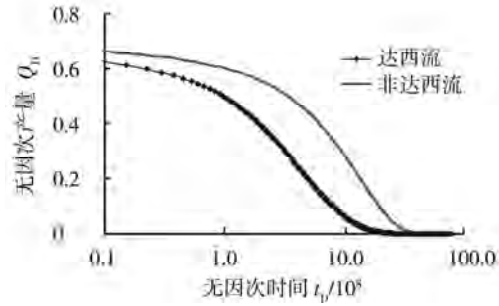


图 1 高速非达西流对产能影响

从无因次产量递减速度,即单位时间内的无因次产量变化看,在早期阶段达西流的产量递减速度高于非达西流,但在后期非达西流时的产量递减速度又高于达西流(见图 2)。

4.3 真实气体 PVT 动态变化对产能的影响

在达西线性渗流和非线性渗流两种情况下分别

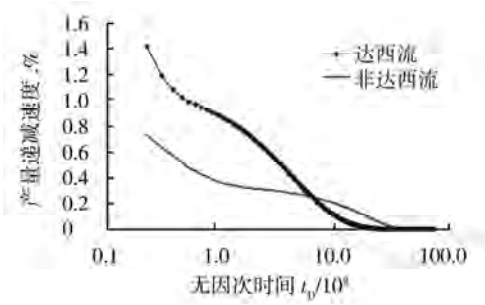


图 2 达西流和非达西产量递减速度对比

计算天然气黏度、天然气压缩系数、PVT 参数(天然气黏度、压缩系数、压缩因子)变化时产能的变化规律,并与 PVT 各参数保持不变时的产能进行对比(见图 3、图 4)。

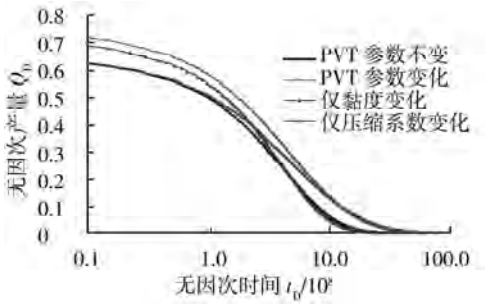


图 3 达西线性流时真实气体 PVT 参数变化对产能影响

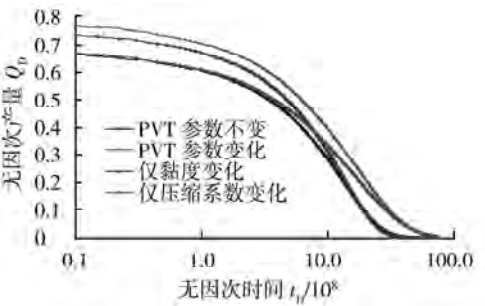


图 4 高速非达西流时真实气体 PVT 参数变化对产能影响

由图 3、图 4 可看出,在两种渗流规律下,PVT 参数变化对产能的影响相似:PVT 参数变化情况下的产能高于 PVT 参数为常数时的产能,同时不稳定渗流的早期阶段,天然气黏度变化对初期产能影响较大,压缩系数的变化对初期产能影响较小;在不稳定渗流的晚期阶段,黏度变化时的产能逐渐接近于 PVT 参数不变时的产能,而压缩系数的变化对产能逐渐产生影响,高于 PVT 参数不变时的产能。

5 结 论

1)高速非达西流气井有相对较长的生产稳定期,产量高于达西流的产量。在早期阶段达西流的

产量递减速度大于非达西流;在后期非达西流的产量递减速度又高于达西流。

2)真实气体的 PVT 参数变化对产能产生了一定影响。PVT 参数变化时的产能高于 PVT 参数不变时的产能;在不稳定渗流的早期阶段,天然气黏度变化导致产量增加,压缩系数变化对产能影响较小;在晚期阶段,压缩系数的变化使产能逐渐升高。

3)在气藏动态分析及产能计算中假定气体 PVT 参数为常数、用达西线性流代替高速非达西流会产生一定的误差;应用高速非达西流和 PVT 参数变化模型计算更加准确。

参 考 文 献

[1] 任岚,胡永全,赵金州,等. 重复压裂气井产能模拟研究[J]. 石油钻探技术,2006,34(1):53-55.

[2] 杨景海,何风珍,邹艳华. 利用不稳定试井资料确定气井动态产能方法研究[J]. 天然气工业,2007,27(3):95-96.
[3] 李晓平,胡勇. 气水同产井瞬态流入动态关系曲线探讨[J]. 天然气工业,2001,21(3):65-67.
[4] Hagoort J. 气藏工程原理[M]. 周勇,等,译. 北京:石油工业出版社,1992.
[5] 葛家理,宁正福,刘月田,等. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
[6] Huang H, Ayoub J. Applicability of the forchheimer equation for non-Darcy flow in porous media[R]. SPE 102715,2006.
[7] 生如岩,李相方. 一种考虑紊流影响的产水气井开采动态预测模型[J]. 中国海上油气(工程),2004,16(5):328-330.
[8] 李治平,邹云龙,青永固. 气藏动态分析与预测方法[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
[9] 田冷,何顺利,李秀生. 低渗透气田砂岩储层应力敏感试井模型研究[J]. 石油钻探技术,2007,35(6):8-11.

[审稿 吴晓东]

A High Velocity Non-Darcy Flow Model Considering Real Gas PVT Behavior

Zhao Xiaoyan Yao Jun Cui Chuanzhi Su Yuliang

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, 257061)

Abstract: Based on the analysis of characteristics of high speed non-Darcy flow, the transient flow equation of high speed non-Darcy flow was created considering the variation of gas viscosity, compression factor and compression coefficient. The flow equation was solved numerically using the finite difference method. The gas production potential under the impact of non-Darcy flow was analyzed. The impact of change of the real gas PVT behavior on the gas production potential was analyzed. The result shows that the gas well production under the non-Darcy flow and the variation of real gas PVT behavior is higher than that of the Darcy flow and the constant of PVT parameters. In the early and later stage, the variation of viscosity and compressibility factor has effect on the productivity of gas respectively. The non-Darcy flow and the variation of real gas PVT behavior should be considered in calculating gas well.

Key words: non-darcy flow; real gas; PVT parameter; percolation model; productivity

~~~~~  
SPE 112450,2008

Removal of Filter Cake Formed by Manganese Tetraoxide-Based Drilling Fluids

四氧化锰钻井液滤饼的清除方法

Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 近来一直用作水基钻井液的加重材料。Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 颗粒为直径 1~2μm 的小球,相对密度为 4.8。开发了一种钻深气井的密度约为 1.6 kg/L 的四氧化锰钻井液,其形成的滤饼包括:聚合物(淀粉、生物聚合物和多阴离子纤维素聚合物)、Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和少量 CaCO<sub>3</sub>。与 CaCO<sub>3</sub> 不同,Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 是强氧化剂,因此,不能用 HCl 清除该钻井液形成的滤饼。该研究的目的是开发一种能有效清除含大量 Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 滤饼的新清洗液。

在不同温度下(最高温度 148.9℃)对各种有机酸、螯合剂、生化酶和这些化学药品组合进行了试验。采用 XRD/XRF/SEM 技术,描述了四氧化锰钻井液滤饼在几种清洗液浸泡前后的特性。采用各种酸和螯合剂,测试了 Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 在 1.4 MPa 压力下,不同温度(最高 140℃)下的溶解度。采用感应耦合等离子体测量了锰在所用化学药剂中的浓度。大量的室内试验表明,滤饼中的 Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 颗粒被聚合物包被,降低了清洗液清除滤饼的能力。为此,先用淀粉特种生化酶浸泡滤饼,然后使用清洗液清除滤饼。发现 Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 在盐酸、柠檬酸和乳酸中的溶解度较高。该文讨论了滤饼的特性和各种清洗液清除滤饼的效率。设计了一种能清除 Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 钻井液滤饼,并同时保持地层和井眼完整的清洗液。

[闫循彪 译]