

文章编号: 1000-0747(2002)03-0071-03

深部凝析气井流入动态分析研究

喻西崇¹, 赵金洲¹, 鄢亚玲², 曾渊奇³

(1. 西南石油学院; 2. 南充市炼油化工总厂; 3. 西南油气田分公司重庆气矿)

基金项目: 国家 863 项目 石油勘探开发分布式集成应用系统(863-306-ZT04-03-3)

摘要: 根据天然气和反凝析液在地层中渗流特点, 结合凝析气体系相态理论及闪蒸计算方法, 运用状态方程进行模拟, 考虑流体相态和组分的变化以及凝析气井的表皮系数, 引入稳态理论的两相拟压力函数, 建立适合凝析气井流入动态预测的方法, 并根据凝析油的临界压力和临界饱和度与渗流的关系, 给出了预测凝析气井井底流压的数学模型: ①井底压力高于露点压力时的渗流数学模型; ②井底流压低于露点压力且凝析油饱和度小于临界饱和度时的渗流数学模型; ③井底流压低于露点压力且凝析油饱和度大于临界饱和度时的渗流数学模型。根据这一思路编制了完整的计算软件。该方法适用于凝析气井流入动态预测。参 9(喻西崇摘)

关键词: 凝析气井; 相态; 流入动态方程; 数学模型

中图分类号: TE372 文献标识码: A

0 引言

凝析气藏的开发比一般气藏复杂得多, 研究凝析气藏流入动态是这类气田气藏工程研究、节点分析及产能计算与配产不可缺少的一部分^[1], 利用它可以选择完井方式及其有关参数, 确定油管直径; 找出限制气井产量的因素; 预测产能变化, 合理配产, 优化采气参数; 预测停喷时机, 确定何时转为排水采气工艺, 以寻求最佳生产方案和最大经济效益。

本文从凝析气渗流特征出发, 根据稳态渗流理论, 建立了 3 个适合凝析气井流入的渗流数学模型^[2]: ①井底压力高于露点压力时的; ②井底流压低于露点压力且凝析油饱和度小于临界饱和度时的; ③井底流压低于露点压力且凝析油饱和度大于临界饱和度时的。求解模型的过程考虑了凝析气体系的组分和相态变化、流态变化、表皮因子等因素对井底流压的影响, 可准确地预测凝析气井的井底流压与产量的关系。

1 地层流入段渗流数学模型的建立

1.1 井底流压高于露点压力时的渗流数学模型

当井底压力高于露点压力时, 地层中的流体为单一气相, 按单相气体在地层中渗流建立其数学模型。

1.1.1 服从二项式渗流定律的平面径向流公式^[3]

1976 年, Johns 等根据其它平面径向流二项式渗流定律, 假定地层流体稳定流动, 经过一系列推导, 得到了著名的 Johns 公式:

$$p_r^2 - p_{wf}^2 = A Q_{sc}^2 + B Q_{sc}^3 \quad (1)$$

$$A = \frac{1.291 \times 10^{-6} T_e \mu Z}{Kh} \left[\ln \frac{r_r}{r_w} - 0.75 + S \right] \quad (2)$$

$$B = \frac{2.828 \times 10^{-21} \beta \mu Z T_e}{r_w h^2} \quad (3)$$

$$\beta = 7.644 \times 10^{5.5} / K^{1.5} \quad (4)$$

1.1.2 AL-Hussainy 和 Ramey 的非达西流动公式^[3]

Johns 公式是应用较广泛的稳定渗流公式, 适用于压力小于 17.58MPa 的气藏。AL-Hussainy 和 Ramey 采用拟压力函数的方法, 推导出了在稳定流动条件下, 压力大于此值时理论上更精确的气体流动方程:

$$m(p_r) - m(p_{wf}) = \frac{1.273 \times 10^{12} Q_{sc} T_e}{Kh} \left[\ln \frac{r_e}{r_w} - 0.75 + S \right] \quad (5)$$

1.2 井底流压低于露点压力且凝析油饱和度小于临界饱和度^[4]时的渗流数学模型

在凝析气井生产过程中, 当井底压力低于露点压力时, 井底会有凝析油析出。研究表明, 凝析油气系统存在一个临界饱和度。当凝析油饱和度小于临界饱和度时, 地层中析出凝析油的流动速度为 0, 习惯上仍用单一的产能方程来处理, 但是由于析出了凝析油, 有必要修正此方程。

1.2.1 一般修正产能方程

据大量文献, 当井底压力低于露点压力且凝析油饱和度小于临界饱和度时, 由于凝析油不能流动, 习惯上将地面条件下得到的凝析油量折算成相应的凝析气量, 再采用单一的产能方程计算, 即 Johns 公式、AL-

Hussainy & Ramey 公式中 Q_{sc} 应包含凝析油的相当量:

$$Q_t = Q_{sc} + 560.85(1.03 - \gamma_o)q_o \quad (6)$$

标准状态下井底压力高于露点压力时有凝析油产出, 也应按此方法将凝析油产量折算成凝析气产量。

1.2.2 相平衡理论修正产能方程^[4]

一般修正法既没有考虑地层中凝析液不断析出的过程, 也没有考虑凝析液流动的过程。为了更好地模拟井底压力低于露点压力时有凝析液析出而导致地层流体组成的变化, 根据相平衡理论, 采用闪蒸计算法求取产能方程中涉及的凝析油的分子量、气体的压缩系数和黏度, 这样仅没有考虑凝析液流动过程。

$$Q_t = Q_{sc} + 24\,040 \rho_o q_o / M_o \quad (7)$$

其中

$$M_o = \sum_{i=1}^{N_i} X_i M_i$$

1.3 井底压力低于露点压力且凝析油饱和度大于临界饱和度时的渗流数学模型

井底附近析出凝析油后, 随着井底压力不断降低, 析出的凝析油不断增加。当凝析油饱和度超过临界饱和度时, 凝析油将开始流动, 地层中出现气液两相流动, 修正法不再适用。这种情况应考虑地层中凝析过程和凝析液流动的特点, 采用新的产能方程。

1.3.1 凝析油、气两相渗流均服从达西定律时的产能方程^[5]

根据达西定律得:

$$Q_t = \frac{8.64 \times 10^{-6} \times 2\pi Kh [\psi(p_e) - \psi(p_{wf})]}{\rho_{sc} [\ln(r_w/r_e) + S]} \quad (8)$$

其定义式为:

$$\psi(p) = \int_0^p \left(\frac{\rho_o K_{rg}}{\mu_o} + \frac{\rho_g K_{rg}}{\mu_g} \right) dp$$

1.3.2 凝析油服从达西定律、凝析气服从非达西定律渗流时的产能方程^[6]

根据达西和非达西定律得:

$$\frac{\rho_{sc}^2}{4\pi^2 h^2} \left[\int_{r_{wf}}^r \frac{\beta_g K_{rg} I_g^2}{\mu_g r^2} dr \right] Q_t^2 + \frac{10^8}{8.64} \frac{\ln(r_w/r_e) + S}{2\pi Kh} \rho_{sc} Q_t - [\psi(p_e) - \psi(p_{wf})] = 0 \quad (9)$$

其中

$$\beta_g = \frac{2.4181 \times 10^{-9.75}}{(KK_{rg})^{1.25} \phi^{0.75}}$$

1.3.3 凝析油、气服从非达西渗流时的产能方程^[7]

根据非达西定律公式, 得:

$$\psi(p_e) - \psi(p_{wf}) = \frac{G_t}{2\pi Kh} \left[\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right] + \int_{r_{wf}}^r \left[\frac{\beta_g K_{rg} G_g^2}{4\pi^2 r^2 h^2 \mu_g} + \frac{\beta_o K_{ro} G_o^4}{4\pi^2 r^2 h^2 \mu_o} \right] dr \quad (10)$$

$$\text{其中 } \beta_g = \frac{2.4181 \times 10^{-9.75}}{(KK_{rg})^{1.25} \phi^{0.75}} \quad \beta_o = \frac{2.4181 \times 10^{-9.75}}{(KK_{ro})^{1.25} \phi^{0.75}}$$

1.4 流体在地层中渗流服从达西定律还是非达西定律的判断方法^[8,9]

井底压力低于露点压力且凝析油饱和度大于临界饱和度时, 地层中析出的凝析油达到流动的条件, 此时需要判断凝析油、气两相的流动规律。经过许多学者的研究, 发现流体在地层中的渗流与管流具有相似性, 可以用雷诺数值来判断。雷诺数有许多不同求法, 目前公认比较合理的是前苏联学者 $\Phi. H. \text{卡佳霍夫}$ 提出的表达式:

$$N_{Re} = \frac{1}{1.75 \times 10^5} \frac{v K^{0.5} p}{\mu \phi^{1.5}} \quad (11)$$

其中

$$v = \frac{Q}{2\pi rh}$$

通过实验获得的临界雷诺数为 0.2 ~ 0.3。雷诺数小于临界雷诺数时流体服从达西渗流; 雷诺数大于临界雷诺数时流体服从非达西渗流。可根据 (11) 式分别求出凝析油、气的雷诺数, 再分别与临界雷诺数比较, 便可以判断凝析油、气在地层中渗流服从达西定律还是非达西定律, 从而确定采用何种产能方程。

2 结论与建议

修正法产能方程和单相拟压力法没有考虑多相流动及流体组分变化, 只适用于凝析液饱和度小于临界饱和度的情况。若生产气液比是常数并近似等于原始气液比, 则稳态条件存在。在满足或近似满足稳态条件下, 用两相拟压力函数研究凝析气井的产能方程是一种简便而有效的方法。

当地层中出现两相流动时, 可以根据 $\Phi. H. \text{卡佳霍夫}$ 提出的表达式来判断地层中凝析油的流动是否服从达西渗流, 并可以制成图版, 通过图版可以很直观地判断凝析气藏各位置处地层中凝析气、凝析油是否服从达西渗流。引入稳态渗流理论计算的两相拟压力函数, 考虑凝析气、凝析油在地层中的流动是否服从达西定律, 可以确定地层中两相流动时不同情况下的产能方程。对比这些产能方程发现, 一般可以不考虑地层中凝析油流动服从非达西渗流的情况。

符号注释:

A ——层流系数; B ——紊流系数; p_r, p_{wf} ——地层供给压力、井底流压, Pa; K ——地层绝对渗透率, μm^2 ; K_{ro}, K_{rg} ——凝析油、凝析气的相对渗透率, 无因次; μ ——气体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; Z ——气体压缩系数, 无因次; T_c ——地层绝对温度, K; h ——储集层有效厚度, m; r_e, r_w ——地层供给半径、井半径, m; S ——表皮系数, 无因次; β ——紊流速度系数, m^{-1} ; q_o, Q_{sc} ——标准态下凝析油、气和修正后得到产量, m^3/d ; γ_o ——凝析油的相对密度, 无因次; X_i ——组分 i 在液相中所占的摩尔分数; M_i ——组分 i 的分子量, kg/mol ; N_c ——组分数; $\psi(p)$ ——两相拟压力函数, $\text{Pa}\cdot\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{Pa}\cdot\text{s})$; ρ_{sc} ——标准态下气体的密度, kg/m^3 ; β_g, β_o ——凝析气相、油相的惯性阻力系数, $\text{Pa}\cdot\text{d}^2/\text{kg}$; ϕ ——孔隙度, f; v ——流体的渗流速度, m/s ; Q ——地层条件下流体的体积流量, m^3/s ; G_o, G_g ——凝析油、凝析气在距井轴半径处的质量流量, g/cm^3 。

参考文献:

[1] 天然气开采工程[M]. 冈秦麟(译). 北京: 石油工业出版社, 1991.

- [2] 杨继盛. 采气工艺基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
 [3] 李亚辉. 凝析气井试油及系统分析[D]. 南充: 西南石油学院, 1998.
 [4] 何志雄. 凝析气井产能分析新方法[J]. 天然气工业, 1996, (5).
 [5] 赫恩杰, 等. 凝析气井动态方法及应用[J]. 断块油气田, 1996, (4).
 [6] 赵碧华. 油气层渗流[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
 [7] 朱德武, 郑晓志. 凝析气流入动态分析新方法[J]. 断块油气田, 1997, (4).
 [8] XIAO Yu, SUN Liangtian, LI Shilun. A new method for predicting the law of unsteady flow through porous medium on gas condensate well[J]. SPE 35649, 1996.
 [9] Vo D T J R, Raghavan R. Performance for gas-condensate reservoirs [J]. SFEFE, 1989, 576-584.

第一作者简介: 喻西崇(1973-), 男, 四川自贡人, 获硕士学位, 西南石油学院博士研究生, 从事油气储运专业凝析油气相态理论研究。地址: 四川省南充市, 西南石油学院研究生院博99, 邮政编码: 637001; 电话: (0817)2642808。

收稿日期: 2001-07-13

(编辑 郭海莉)

A study on deep condensate gas well inflow performance equation

YU Xi-chong¹, ZHAO Jin-zhou¹, WU Ya-ling², ZENG Yuan-qi³

(1. Southwest Petroleum Institute, Sichuan 637001, P. R. China; 2. Nanchong Refinery Factory, Sichuan 637000, P. R. China;

3. Chongqing Natural Gas Division, Southwest Oil and Gas Field, PetroChina Chongqing 400021, P. R. China)

Abstract: In this paper, a new method is brought forward which is suitable for condensate gas flow state. The new method bases on the flow character of natural gas and the petro-condensate liquid in the formation, combining with phase state theory of condensate gas. At the same time, the change of the liquid phase and the components and the various skin factors under different condition are also considered. The two-phase pseudo-pressure function of the theory of stable state is used. A new equation is adopted to calculate the well bottom flow pressure. For these method and concept, the mathematics model for three different situation: First, well bottom flow pressure is higher than dew point pressure. Second, well bottom flow pressure is lower than dew point pressure but condensate oil saturation lower than flow saturation. Last, well bottom flow pressure is lower than dew point but condensate oil saturation higher than flow saturation. Developing the relevant software to compare with the result of well test, the new method is suit for the forecast of the influx state in condensate well.

Key words: condensation gas well; phase behavior; inflow performance equation; mathematical model