

酸气回注井筒流动模型

周静¹ 陈京元² 高培丞² 唐洪俊²

(1.加拿大里加纳大学 2.中国石油西南油气田分公司)

周静等.酸气回注井筒流动模型.天然气工业,2005;25(8):76~78

摘要 将酸气压缩后回注到已废弃的产层或水层中,逐渐成为石油和天然气工业有效减少环境污染的方法之一。酸气回注不仅可缓解目前硫磺生产和需求的矛盾,而且可利用硫化氢和二氧化碳作为提高采收率措施的气源。酸气回注不同于常规的注水或注天然气,涉及到复杂的相态转变以及相应的流体物理性质(如密度和粘度的变化)。因此,与压力、温度和流体组成相关的相态是决定井内流动压力剖面的关键因素,如何选取适当的状态方程至关重要。文章针对目前研究存在的不足,结合 Patel-Teja 三参数状态方程和修改的 Peng-Robinson 状态方程预测酸气在不同相态下的密度和粘度,建立了井内流体流动的数学模型,用四阶龙格—库塔法对该模型进行了求解,然后用现场实测数据对模拟结果进行了验证和比较,并讨论了相态对流体物理性质和注入压力剖面的影响。

关键词 酸气 流动 注入压力 状态方程 相态

近年来,如何降低环境污染是石油和天然气工业所面临的十分严峻的问题。污染源之一是富含硫化氢(H_2S)和二氧化碳(CO_2)的油气田所排放的酸性气体(简称酸气)。酸气主要是由 H_2S 和 CO_2 组成,可能含有少量的杂质,如甲烷(CH_4)。将酸气压缩后回注到已废弃的产层或水层中,是有效减少环境污染的方法之一。国外对这种措施的整体研究已有许多成功的经验,包括酸气压缩、地面流动、井筒流动以及地层内的流动,参见文献[1,2]。但单独考虑各个环节的研究还很少,而且计算模型不够精确。流体在井筒内的流动,不仅影响地面压缩机机型和出口压力的选择,而且也耦合地层内的流动。因此,建立精确的井筒流动模型,以预测注入井内的压力剖面十分必要。

本文结合 Patel-Teja 三参数状态方程和修改的 Peng-Robinson 状态方程预测酸气在不同相态下的密度和粘度,建立了井内流体流动的数学模型,用四阶龙格—库塔法对该模型进行了求解,然后用现场实测数据对模拟结果进行了验证和比较,并对不同相态下的计算结果进行了讨论。该模型能准确预测酸气回注井筒复杂的流动情况,包括单相气流,单相液流和气液两相流。

一、数学模型

注入井井口压力可以表示为:

$$p_{wh} = p_R - \Delta p_G + \Delta p_F + \Delta p_A \quad (1)$$

式中: p_{wh} 为井口压力, MPa; p_R 为井底压力, MPa; Δp_G 为重力压降, MPa/m; Δp_F 为摩擦压降; Δp_A 为加速度压降。

作以下假设:① 流体流动状态为稳定流动;② 井内温度分布服从线性分布,且忽略各种介质之间的传热。

根据上述假设,以井口为坐标原点,沿油管轴线下向为坐标轴正向建立坐标系。由流体质量守恒、动量和能量守恒原理,可得到井筒压力梯度方程和温度梯度方程:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\rho g - f \frac{\rho v |v|}{2D}}{1 - \frac{v^2}{p}} \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dz} = G_T \quad (3)$$

式中: p 为压力, MPa; T 为温度, K; z 为深度, m; ρ 为流体密度, g/cm^3 , $\rho = \rho(p, T)$, 酸气密度的计算用 Patel-Teja 状态方程, 参见文献[3]; f 为摩擦因子, 它与流体粘度 μ 有关, $\mu = \mu(p, T)$, 酸气粘度的计算用修改的 Peng-Robinson 状态方程, 参见文献[4]; v

作者简介:周静,女,2000年毕业于西南石油学院石油工程系,获硕士学位;现就读于加拿大里加纳大学石油工程系。地址:Faculty of Engineering (PSE), University of Regina, 3737 Wascana Parkway, Regina, SK, S4S 0A2, Canada.

为流体流速; D 为油管直径; G_r 为地温梯度, g 为重力加速度。

式(2)和式(3)构成了描述井筒流体压力和温度分布的常微分方程组。若已知井底的压力和温度, 采用四阶龙格—库塔法求解上述方程组就可以得到流体沿井筒的压力和温度分布。

二、酸气的物理性质

假设注入酸气中不含水, 注入温度始终高于水合物形成的温度, 酸气只由 H_2S 、 CO_2 和少量的 CH_4 组成。影响压力梯度计算的流体性质只有密度和粘度两个因素。基于非烃气体的性质, 本文选用精度较高的 Patel-Teja 三参数状态方程和修改的 Peng-Robinson 状态方程分别预测酸气在不同相态下的密度和粘度。

Patel-Teja 状态方程:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+c(V-b)} \quad (4)$$

式中: V 为摩尔体积; a , b 和 c 分别状态方程的相关参数; R 为通用气体常数。

流体的密度为:

$$\rho = \frac{M}{v} \quad (5)$$

式中: M 为流体分子量。

流体的粘度由修改的 Peng-Robinson 状态方程求得:

$$T = \frac{rp}{\mu - b'} - \frac{a}{\mu(\mu + b) + b(\mu - b)} \quad (6)$$

式中: a , b , b' 和 r 分别为状态方程的相关参数。

三、计算结果与现场实测数据比较

本文引用文献[5]给出的两口酸气回注井的数据与上述模型的数值计算结果进行了比较。图 1 和图 2 是 Well A 的注入压力剖面和流体的密度和粘度剖面。从图 1 中可以看出, 流体在整个井筒中都处于液态。通过比较可以看出, 本文预测的井口注入压力于实测注入压力非常接近。实测为 7.45 MPa, 本文预测为 7.66 MPa, 相对误差小于 3%。从图 2 中可以看出, 井口条件下, 流体的密度和粘度分别是 897.09 kg/m^3 和 $0.329 \text{ mPa} \cdot \text{s}$; 井底条件下, 流体处于超临界状态, 但仍是液相, 流体的密度和粘度分别是 615.10 kg/m^3 和 $0.152 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。虽然流体在整个井筒都以液相存在, 但它的密度和粘度却有很大变化, 这也说明酸气以液相回注时与常规的注水不同。如果假设液态酸气不可压缩且具有不变的密度

和粘度将会错误地估计井口注入压力。图 3 是 Well B 的注入流体的密度和粘度剖面。与 Well A 情况不同, 流体在井底条件下处于超临界状态(液态), 在温度为 8°C (离井口大约 200 m) 时穿过两相区, 成为气液两相, 所以流体的密度和粘度都逐渐减小, 同时流动压降减小。从分析可以看出, 本文的模型有较高的精度。值得说明的是, 实际注气过程中, 应尽量避免两相或气相注入, 而保持液相注入, 因为前者所需的注入压力较大, 从而对压缩机的要求较高。

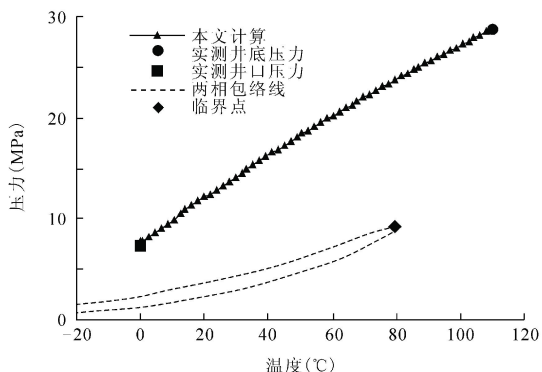


图 1 Well A 井筒压力剖面

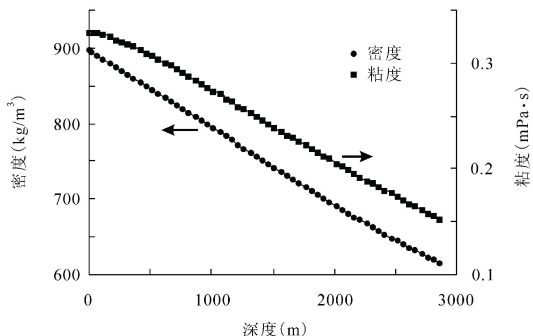


图 2 Well A 井筒密度和粘度剖面

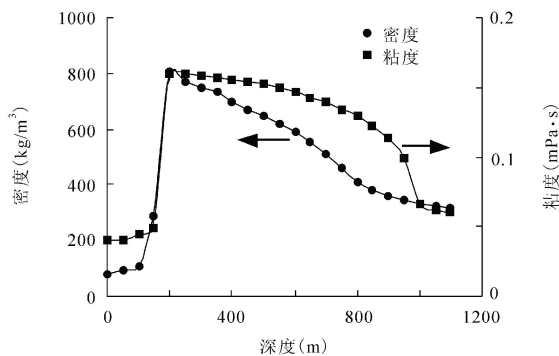


图 3 Well B 井筒密度和粘度剖面

四、特例讨论

本文列举了一个特例 Well C, 说明如果以气相

注入,相态对压力剖面 and 流体物理性质的影响。给定井底压力 4 MPa,井底温度 50 °C,井口温度 0 °C,井深 1200 m。酸气组成:H₂S 为 77%,CO₂ 20%,CH₄ 3%。从图 4 中可看出,整个井筒内流体保持气相。从图 5 中可看出,虽然流体呈气相,但整个井筒中,其密度和粘度近似于常数。在常规注天然气过程中,始终假设气体是可压缩的且其密度和粘度是压力和温度的函数。但酸气回注中,在此特例情况下,我们可假设气体的性质在整个井筒中近似不变。

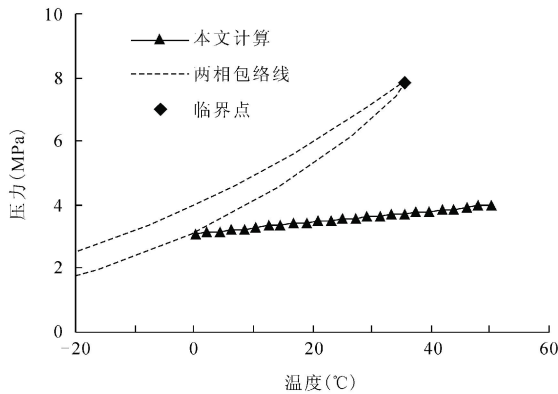


图 4 Well C 井筒压力剖面

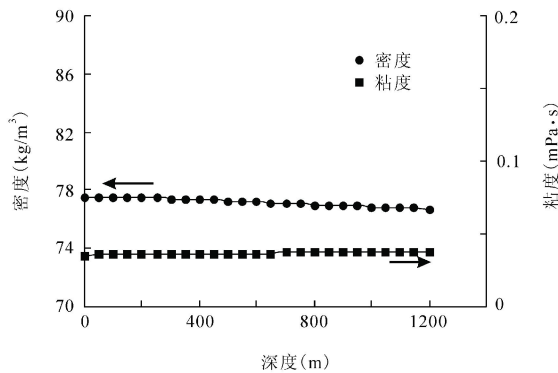


图 5 Well C 井筒密度和粘度剖面

五、结 论

(1)本文模拟所得井口注入压力与现场实测数据比较吻合,表明本文的数学模型和数值方法可行。本文的研究成果可为酸气回注地面设备的参数设计和选取提供较为精确的计算结果。

(2)流体物理性质的影响在酸气回注过程中起着十分重要的作用。

(3)尽量保证液相注入,这样可以降低地面的注入压力。

参 考 文 献

- 1 Wichert E, Royan T. Acid gas injection eliminates sulfur recovery expense. *Oil & Gas J*, 1997; 95 (16): 63—72
- 2 Carroll J J, Maddocks J R. Design considerations for acid gas injection. *Laurance Reid Gas Conditioning Conference*, Norman Oklahoma, Calgary, Alberta, Canada, February 1999
- 3 Patel N, Teja A. A new cubic equation of state for fluids and fluid mixtures. *Chem Eng Sci*, 1982; 37 (3): 463—473
- 4 Guo X Q, Sun C Y, Rong S X *et al*. Equation of state analog correlations for viscosity and thermal conductivity of hydrocarbons and reservoir fluids. *J Petrol Sci Eng*, 2001; 30: 15—27
- 5 Lock B W. Acid gas disposal a field perspective. *76th Annual Convention GPA*, San Antonio, Texas, March 1997

(收稿日期 2004-11-26 编辑 钟水清)