

凝析气藏循环注气开发注入干气超覆数值模拟

孙 岩¹, 朱维耀¹, 李保柱², 夏 静², 焦玉卫², 黄 堃¹

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:针对注入干气超覆现象影响凝析气藏循环注气开发效果并增加生产成本的现象,研究凝析气藏注入干气的超覆规律,基于对流扩散理论建立凝析气藏注入干气运移的数学模型,并应用该模型研究储层渗透率、储层厚度和注采压力比对注入干气超覆的影响。结果表明:随着干气注入量增加,注入干气与凝析气过渡带的宽度逐渐增加,过渡带中气体物质的量分数分布呈现中间密、两头疏的形状;运动方程中忽略重力项,干气垂向速度低而不易发生超覆;注入干气超覆强度随着储层渗透率增加而降低,减少储层开采厚度和提升注采压力比可明显降低注入干气超覆。

关键词:凝析气藏; 气体运移; 对流扩散; 注入干气超覆; 数值模拟

中图分类号:TE 372 **文献标志码:**A

引用格式:孙岩,朱维耀,李保柱,等. 凝析气藏循环注气开发注入干气超覆数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018,42(2):129-135.

SUN Yan, ZHU Weiyao, LI Baozhu, et al. Numerical simulation on dry gas overlap in cycling gas injection development of condensate gas reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(2):129-135.

Numerical simulation on dry gas overlap in cycling gas injection development of condensate gas reservoirs

SUN Yan¹, ZHU Weiyao¹, LI Baozhu², XIA Jing², JIAO Yuwei², HUANG Kun¹

(1. School of Civil and Resource Engineering in University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The overlap phenomenon of injected dry gas discovered in recent years has influenced the development effect of gas injection in condensate gas reservoirs, and therefore increased the production cost. In order to study the migration rule of dry gases in condensate gas reservoirs, based on the theory of convection diffusion, a mathematical model of dry gas migration in condensate gas reservoirs was established. The effects of reservoir permeability, reservoir thickness and injection production pressure ratio on the injection dry gas overlap were studied by using this model. The results show that the width of the transition zone between dry gases and condensate gases increases gradually with the increase of the amount of dry gas injection, and the distribution of dry gas mole fraction in the transition zone presents the shape which is dense in the middle and sparse at two heads. The gravity term is ignored in the motion equation, and the dry gases are not easy to overlap as their vertical velocities are low. The overlap strength of the injected dry gases decreases with the increase of the permeability of the reservoir. Decreasing the reservoir thickness and increasing the pressure ratio of injection and production can significantly reduce the overlap of the injected dry gases.

Keywords: condensate gas reservoir; gas migration; convection diffusion; injection dry gas overlap; numerical simulation

高含凝析油凝析气藏通常采用循环注气保持地层压力的开发方式来提高凝析油气的采收率^[1-4]。

目前注气被认为是富含凝析油型的凝析气藏开采的较好手段,注入干气体保持压力方式主要分为全面

收稿日期:2017-10-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2013CB228002);中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2016B-1504)

作者简介:孙岩(1983-),女,博士研究生,研究方向为渗流力学、油气田开发等。E-mail:suyafxs@163.com。

通讯作者:朱维耀(1960-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为渗流力学、非常规油气田开发等。E-mail:weiyao@sina.com。

保压和部分保压开采,注入的气体介质主要有干气、氮气、空气和二氧化碳^[5-6],注入干气目前被认为是较好的凝析气藏注入介质^[7-8]。随着凝析气藏循环注干气提高采收率技术发展的同时,由于高温高压储层组分运移过程中的重力差异和热动力作用对组分运动规律认识还不够清楚,发现注入干气超覆现象影响了凝析气藏循环注气开发效果和增加了生产成本^[9-10],凝析气藏循环注气过程中,注入干气和地层流体之间存在混合过渡带,同时由于两种流体间的密度差异及储层非均质性的影响导致注入干气超覆。目前关于由重力引起的超覆研究理论多集中于油藏注气开发及稠油热采方面^[11-13],而对于凝析气藏气体超覆理论研究较少。关于凝析气藏注入干气超覆的研究目前主要集中在驱替机制和室内试验方面。焦玉卫等^[14]通过研究注入干气驱替机制,认为注入干气在储层中的流动受微观混合、黏度差、重力超覆和高渗条带的影响,注气前缘存在注入干气与地层流体的混合带;赵元良等^[15]采用井下流体组分分析仪对 YH 凝析气田循环注气部分进行扫描测试,验证了干气—过渡带—凝析气纵向分布特征,认识了注气超覆驱替规律;张利明等^[16]通过试验研究了注入干气与地层流体间存在稳定的界面。关于凝析气藏注入干气驱替凝析气的数学模型主要基于全组分模型,全组分模型涉及复杂的相平衡理论^[17-18]。受微观扩散的影响,注入干气前缘存在注入干气与原始地层凝析气的混合带^[19],因此也需要对注入干气与凝析气的扩散模型进行进一步研究。一般应用 Fick 定律描述传质过程,该定律认为扩散通量与浓度梯度存在线性关系,即浓度梯度是产生扩散的推动力^[20]。Fick 定律并不是在所有情况下都成立,Ghorayeb 等^[21]建立的组分扩散模型充分考虑了热力学的非理想型,被广泛用于描述单组份或复杂多组分系统的传质过程。国内外学者对凝析气藏注入干气超覆问题开展的研究存在以下不足:凝析气藏注入干气超覆研究理论大多集中利用室内试验和仪器测试手段来验证超覆现象,对于注入干气超覆数学模型和超覆规律的研究还不够充分;全组分模型是以烃类体系的全部自然组分为基础,主要考虑相间传质及相态变化,未考虑组分对流扩散问题,导致其不能充分解释注入干气的运移和超覆规律。笔者考虑气体密度差异及重力影响,基于对流扩散理论建立凝析气藏注气开发注入干气运移数学模型,应用该模型分析注采井间的组分分布和运移规律,并研究重力、储层性质和开发参数对注入干气

超覆的影响。

1 注入干气运移模型建立

1.1 基本假设

主要考虑注入干气的超覆问题,由于注入干气和储层凝析气的密度差异较大,因而假设储层中气相只包含注入干气和储层凝析气两个拟组分,图 1 为注入干气驱替凝析气示意图。为了简化模型,假设地层压力高于露点压力,储层中只出现混合气体的流动,而不考虑凝析油流动和油气相变问题,此模型中考虑重力影响。

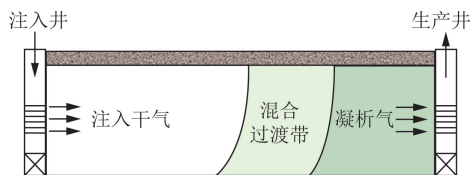


图 1 注入干气驱替凝析气示意图

Fig.1 Schematic diagram of injection dry gas displacement condensate gas

1.2 控制方程组建立

假设注入干气和凝析气为拟组分 A 和 B,考虑两组分对流扩散问题,则描述拟组分 A 和 B 的对流扩散方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \omega_A \varphi) + \nabla \cdot (\rho_m \omega_A v_m) + \nabla \cdot (J_A \varphi) = q_A, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \omega_B \varphi) + \nabla \cdot (\rho_m \omega_B v_m) + \nabla \cdot (J_B \varphi) = q_B. \quad (2)$$

式中, ω_A 和 ω_B 分别为拟组分 A 和 B 的质量分数; ρ_m 为混合气体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; v_m 为混合气体渗流速度, m/s ; φ 为孔隙度; J_A 和 J_B 分别为拟组分 A 和 B 质量扩散通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; q_A 和 q_B 为源汇项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

则拟组分 A 和 B 总质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{i=A}^B \rho_m \omega_i \varphi \right) + \nabla \cdot \left(\sum_{i=A}^B \rho_m \omega_i v_m \right) + \nabla \cdot \left(\sum_{i=A}^B J_i \varphi \right) = \sum_{i=A}^B q_i. \quad (3)$$

由于拟组分 A 和 B 满足关系式:

$$\sum_{i=A}^B \omega_i = 1, \quad (4)$$

$$\sum_{i=A}^B J_i = 0, \quad (5)$$

$$\sum_{i=A}^B q_i = q_m. \quad (6)$$

则混合气体总质量守恒方程式(3)变为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varphi) + \nabla \cdot (\rho_m v_m) = q_m. \quad (7)$$

混合气体在多孔介质中流动符合达西定律,重力因素对气体组分的分布规律有明显影响。在运动方程中考虑重力项,混合气体的运动方程可写为

$$v_m = -\frac{k}{\mu_m}(\nabla p_m - \rho_m g \nabla D). \quad (8)$$

式中, p_m 为混合气体压力, Pa; μ_m 为混合气体黏度, Pa·s; k 为渗透率, m^2 ; g 为自由落体加速度, 9.8 m/s^2 ; D 为标高, m。

1.3 补充方程和初边值条件

为了能够更加真实反映气体的对流扩散过程,利用 Ghorayeb 和 Firoozabadi 提出的热力学扩散模型计算拟组分 A 和 B 的扩散通量为

$$J_A = -\rho_m(D_{AB} \nabla \omega_A + D_A^T \nabla T), \quad (9)$$

$$J_B = -\rho_m(D_{BA} \nabla \omega_B + D_B^T \nabla T). \quad (10)$$

式中, D_{AB} 、 D_{BA} 分别为拟组分 A 和 B 相互作用的扩散系数, m^2/s ; D_A^T 、 D_B^T 分别为拟组分 A 和 B 的温度扩散系数, $m^2/(s \cdot K)$; T 为储层温度, K。

根据质量和体积的关系,拟组分 A 和 B 的质量分数可表示为

$$w_A = \frac{M_A x_A}{M_m}, \quad (11)$$

$$w_B = \frac{M_B x_B}{M_m}. \quad (12)$$

式中, x_A 、 x_B 分别为拟组分 A 和 B 的物质的量分数; M_A 、 M_B 分别为拟组分 A 和 B 的摩尔质量, kg/mol; M_m 为拟组分 A 和 B 的总摩尔质量, kg/mol。

两个拟组分物质的量分数的约束方程为

$$x_A + x_B = 1. \quad (13)$$

凝析气藏注入大量干气后必然引起储层流体密度的变化。由于干气密度小于储层凝析气密度,随着干气注入量增多,导致混合气体密度下降。根据 Boussinesq 近似,只在重力项中考虑密度的变化,混合气体的密度可表示为

$$\rho_m = \rho_0(1 - \alpha(T - T_0) - \beta(x_A - x_{A0})). \quad (14)$$

式中, ρ_0 为参考密度, kg/m^3 ; T_0 为参考温度, K; x_{A0} 为拟组分 A 的参考物质的量分数; α 为热膨胀系数, K^{-1} ; β 为浓度扩散系数。

在凝析气藏循环注气数值模拟过程中,需要对初始条件和边界条件加以限制。初始时刻储层压力、温度和注入干气的物质的量分数为已知函数,即

$$p(x, y, z) \big|_{t=0} = p_i, \quad (15)$$

$$T(x, y, z) \big|_{t=0} = T_i. \quad (16)$$

$$x_A(x, y, z) \big|_{t=0} = 0. \quad (17)$$

为了更为直观地研究凝析气藏注入干气在地层中的分布和运移规律,以注气井和采气井之间的储层剖面模型为研究对象,此时的边界条件分为注采气井两端和储层上下边界条件,储层上下边界条件为无通量条件,注气井端的边界条件为

$$p_{wf} \big|_{r_1} = p_{jconst}, \quad (18)$$

$$x_A \big|_{r_1} = 1. \quad (19)$$

采气井端的边界条件为

$$p_{wf} \big|_{r_2} = p_{pconst}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial N_A}{\partial n} \bigg|_{r_2} = 0. \quad (21)$$

式中, p_{jconst} 、 p_{pconst} 为压力常数; $(\partial N_A / \partial n) \big|_{r_2}$ 为采气井端边界 r_2 上拟组分 A 的质量通量 N_A 对外法线方向 n 的导数。

2 模型求解

方程(1)、(2)、(7)、(8)构成凝析气藏循环注气开发注入干气运移的控制方程组,利用辅助方程(9)~(14),将方程组中的关联变量消去,则方程组中含2个独立未知量 p_m 、 x_A ,结合初始条件和边界条件,可求得压力和浓度分布。利用有限差分方法进行求解,首先采用块中心差分网格离散气藏空间,得到压力和浓度的线性差分方程组,进而采用逐次超松弛迭代法^[22]对线性差分方程组进行编程求解。压力和浓度场求解步骤如下:①给出计算网格节点的压力和浓度初始值(p_{mi} 、 x_{Ai})以及相关的地层流体参数;②利用压力和浓度初始值(p_{mi} 、 x_{Ai})计算物性参数和方程组系数矩阵值,选取合适的松弛迭代因子进行求解,得到下一时间步长的压力和速度分布(p_{mi+1}^0 、 v_{mi+1}^0)(上角标代表迭代次数),将计算的速度结果代入到浓度差分方程组进行计算,进而得到该时刻的浓度分布 x_{Ai+1}^0 ;③取初始值和上一步骤计算值的平均值($\overline{p_{mi+1}^0}$ 、 $\overline{x_{Ai+1}^0}$)作为下一步迭代计算的计算条件进行步骤②,计算下一时间步长的压力和浓度分布(p_{mi+1}^1 、 x_{Ai+1}^1);④重复步骤③,而平均值($\overline{p_{mi+1}^1}$ 、 $\overline{x_{Ai+1}^1}$)取为($\overline{p_{mi+1}^0}$ 、 $\overline{x_{Ai+1}^0}$)与(p_{mi+1}^1 、 x_{Ai+1}^1)的平均值,以初始值 p_{mi} 作为上一时间步长的压力分布值,直至满足 $|p_{mi+1}^{n+1} - p_{mi+1}^n| < \varepsilon_p$ 、 $|x_{Ai+1}^{n+1} - x_{Ai+1}^n| < \varepsilon_x$,迭代结束,(p_{mi+1}^{n+1} 、 x_{Ai+1}^{n+1})即为下一时间步长的迭代计算值;⑤前4个步骤完成了一个时间步长内的迭代过程,将该计算结果作为步骤①中的上一步计算结果进行下一时间步长的迭代计算。

3 实例分析与讨论

选取中国新疆 YH 凝析气藏作为研究对象, 储层和流体参数: 初始地层压力为 44 MPa, 地层温度为 408 K, 孔隙度为 15%, 储层厚度为 60 m, 水平渗透率为 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 垂向与水平渗透率比值为 0.1, 注入干气的密度为 246 kg/m^3 , 凝析气的密度为 345 kg/m^3 。以 1 注 1 采的剖面模型为例, 注采井距为 800 m, 剖面模型在 x 、 y 和 z 方向的网格数为 $80 \times 1 \times 6$, 网格大小为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 其中 x - z 平面矩形区域的网格划分见图 2, 注入井位于矩形区域的左边界($x=0$), 采出井位于矩形区域的右边界($x=d$); 生产控制条件: 注气井向储层注入介质为干气, 注入干气物质的量分数为 1。采气井采出不同物质的量分数的干气和凝析气, 采取的生产方式为定井底压力生产, 则 $x=0$ 和 $x=d$ (矩形区域两端) 为定压边界, 注入压力为 46 MPa, 采出压力为 44 MPa。

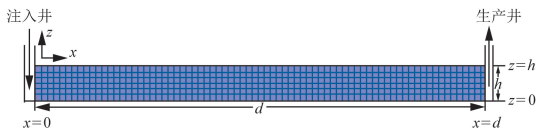


图 2 矩形区域网格划分示意图

Fig. 2 Rectangular region grid partition diagram

3.1 注入干气与凝析气混合过渡带分析

矩形区域内不同时间时注入干气物质的量分数等值线分布规律见图 3。从图 3 中可以看出, 时间点分别取 1、100、200、300、400 和 500 d, 在 x - z 平面上随着时间和注入干气量增加, 注入的干气推动凝析气向生产井方向移动, 注入干气与凝析气混合过渡带的范围逐渐变宽, 说明注入干气驱替凝析气, 不是立即混相的状态, 而是存在一个较大范围内的混合过渡带。过渡带区域的注入干气物质的量分数等值线分布呈现中间密、两头疏的形状, 这在一定程度上反映了过渡带中间物质的量分数变化较大, 而过渡带两侧物质的量分数变化较小的特点, 符合气气混合规律。

在注入干气与凝析气混合的地下储层分析中, 对于储层垂向上的任一位置 z , 将注入干气物质的量分数 0.1 对应的水平距离 $x_{0.1}$ 与注入干气物质的量分数 0.9 对应的水平距离 $x_{0.9}$ 的差值定义为混合带的宽度 d_m , 从图 3 可以看出, 储层顶部和底部混合过渡带宽度差别不大, 选择储层中部($z=h/2$) 位置处的过渡带宽度作为过渡带的平均宽度。图 4 为不同时间条件下储层中部位置处注入干气物质的量

分数随水平距离的变化曲线。从图 4 中可以看出, 随着时间增加, 注入干气与凝析气的对流扩散过程是一个从无到有、由小逐渐扩大的过程, 混合过渡带的宽度逐渐增加。图 5 为混合过渡带宽度随时间的变化曲线。当时间由 1 d 变为 500 d 时, 过渡带的宽度由 2 m 增加到 469 m。

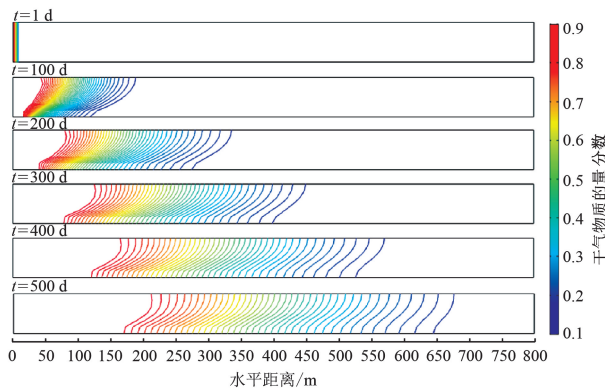


图 3 矩形区域内随时间变化的注入干气体物质的量分数分布等值线

Fig. 3 Contour map of dry gas molar fraction in rectangular region

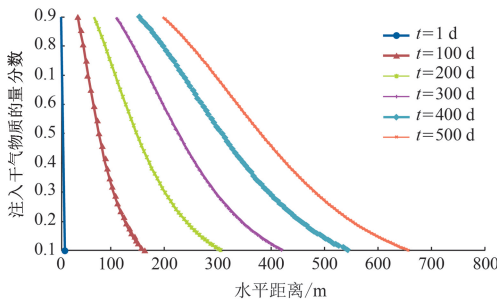


图 4 不同时间条件下注入干气物质的量分数随水平距离变化

Fig. 4 Curves of dry gas molar fraction with horizontal distance under different time conditions

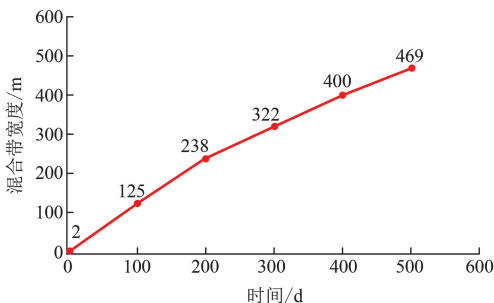


图 5 混合过渡带的宽度随时间变化

Fig. 5 Curve of width of mixed transition zone with time

3.2 注入干气超覆分析

由于气体混合过渡带区域的注入干气物质的量分数等值线呈现中间密、两头疏的特点, 因此注入干气的超覆最大处应集中在过渡带中间部位, 鉴于速

度场的变化范围主要集中在注采端附近 250 m 的范围内(图 6),因此在 $x=250\text{ m}$ 位置处作垂直于 x 方向的截线,研究经过这一截线的注入干气物质的量分数变化和注入干气的超覆规律。

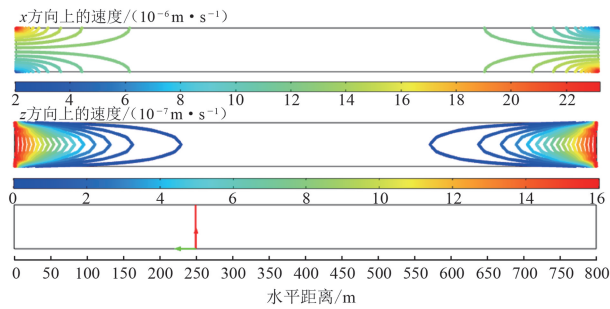


图 6 矩形区域内 x 和 z 方向上速度分布等值线和 $x=250\text{ m}$ 截线图

Fig. 6 Contour map of velocity at x and z direction in rectangular region and $x=250\text{ m}$ line

假设 $t=t_0$ 条件下,有一垂直于 x 方向的截线位于 $x=x_0$ 位置处,储层顶部($z=h$)的注入干气物质的量分数为 a ,储层底部($z=0$)的注入干气物质的量分数为 b ,则储层顶部注入干气物质的量分数与底部注入干气物质的量分数之差 f 为

$$f \Big|_{x=x_0}^{t=t_0} = a - b. \tag{22}$$

f 可以用来表征注入干气超覆规律, f 值越大,说明注入干气的超覆越大。图 7 为不同时间条件下经过 $x=250\text{ m}$ 截线处注入干气体物质的量分数的变化曲线。从图 7 中可以看出,随着垂向距离 z 增加,注入干气体物质的量分数有一定程度增加。

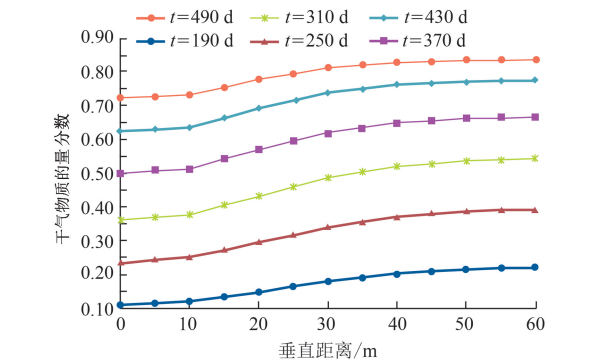


图 7 不同时间条件下注入干气物质的量分数随垂向距离变化

Fig. 7 Curves of dry gas molar fraction with vertical distance under different time conditions

表 1 为 $x=250\text{ m}$ 位置处储层顶底部干气物质的量分数差的计算结果。由表 1 中可以看出,过渡带中部位置的注入干气物质的量分数变化最大,当储层底部和顶部注入干气物质的量分数分别为 0.361 和

0.542 时, f 为 0.181,而过渡带中部位置两侧的 f 逐渐降低,这与前面的过渡带中间密、两头疏的分布形状一致。

表 1 储层顶底部干气物质的量分数差
Table 1 Difference of dry gas mole fraction at top and bottom of reservoir

时间 t/d	注入干气物质的量分数 x		储层顶底部干气物质的量分数差 f
	储层顶部 ($z=60\text{ m}$)	储层底部($z=0$)	
190	0.220	0.110	0.111
250	0.393	0.236	0.157
310	0.542	0.361	0.181
370	0.666	0.500	0.166
430	0.774	0.633	0.141
490	0.835	0.722	0.113

3.3 重力对注入干气超覆影响

图 8 为模型中考虑重力和不考虑重力两种条件下矩形区域内注入干气体物质的量分数分布等值线。从图 8 中可以看出若忽视重力的影响,则注入干气和凝析气只发生扩散现象而未产生超覆现象。运动方程中不考虑重力项,则计算的气体垂向速度为 $(0.9 \sim 6.1) \times 10^{-18}\text{ m/s}$;若考虑重力项,计算的气体垂向速度数为 $(0.2 \sim 16) \times 10^{-7}\text{ m/s}$,水平速度数为 $(0.2 \sim 2.3) \times 10^{-5}\text{ m/s}$,这说明重力对垂向上的速度分布有重要影响,也影响注入干气在垂向上的运动和扩散,若忽视重力的影响,则注入干气体在垂向上的流动量很少,不易发生超覆现象。

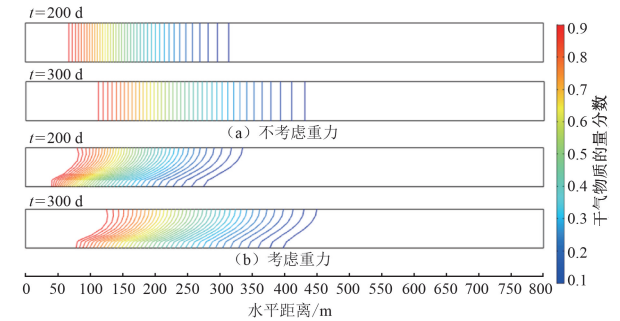


图 8 考虑重力和不考虑重力条件下矩形区域内注入干气物质的量分数分布等值线

Fig. 8 Contour map of dry gas mole fraction in rectangular region with gravity and without gravity

3.4 储层渗透率、厚度和注采压力比对注入干气超覆影响

图 9 为不同储层渗透率、厚度和注采压力比条件下 $x=250\text{ m}$ 处的储层顶底部干气物质的量分数差 f 与储层底部($z=0$)注入干气物质的量分数的变化曲线。从图 9(a)中可以看出,随着注入干气量增加,经过 $x=250\text{ m}$ 位置处的 f 呈现先增加后减小的趋势,这与过渡带的形状一致,储层渗透率由 $50 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$ 提升到 $150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (3 倍), f 最大值由 0.249 降到 0.145 (降低 41.8%), 因此随着渗透率增加, f 减小, 注入干气超覆强度降低。

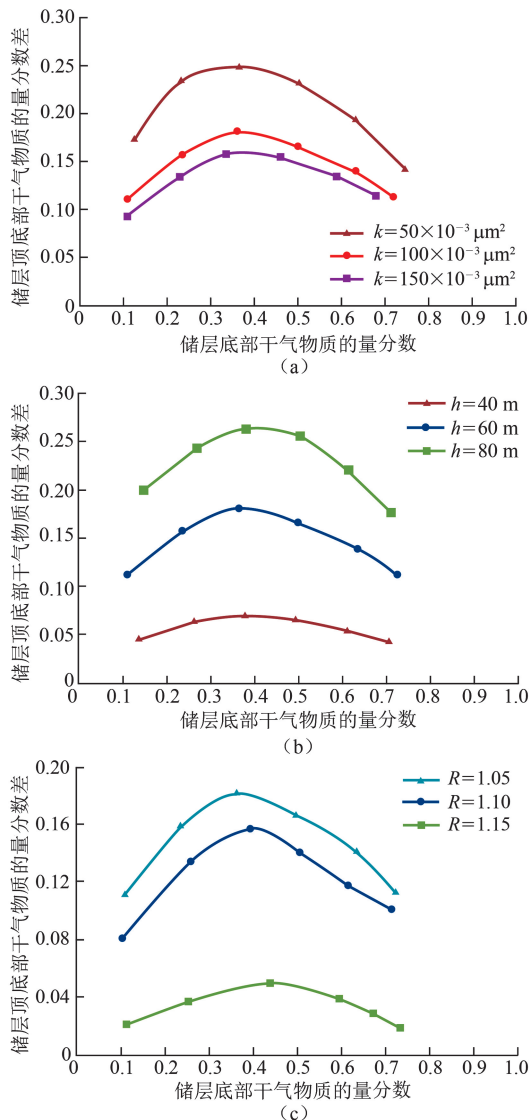


图9 不同储层渗透率、厚度和注采压力比条件下储层顶部干气物质的量分数差随底部干气物质的量分数的变化

Fig.9 Changes of difference between dry gas mole fraction at top and bottom with dry gas mole fraction of bottom at different permeability, thickness and injection and production pressure ratio

由于注入干气的超覆是在储层垂直方向上发生的现象,因此储层厚度也是一个非常重要的参数。由图9(b)可以看出,储层厚度由80 m减少到40 m (减少了50%), f 最大值由0.263降到0.070 (降低了73.4%),说明随着储层厚度减少, f 降低,注入干气在垂向上的超覆减轻。

注采压力比直接影响到储层水平压力梯度和水平速度大小,如果水平压力梯度远大于垂直压力梯

度,注入干气超覆将大大降低,水平驱替效率得以提高。定义注入端与采出端的压力之比为注采压力比 R ,由图9(c)可以看出, R 由1.05上升到1.15, f 最大值由0.181降到0.049 (降低了72.9%),说明随着注采压力比增加,水平压力梯度增加幅度变大,注入干气在水平方向的运移能力增强,注入干气在垂向上的超覆减弱,因此注采压力比越大,注入干气越难超覆。

4 结 论

(1)注入干气和地层凝析气存在气体混合过渡带,随着时间和注入干气量的增加,过渡带范围逐渐变宽,过渡带气体物质的量分数分布呈现中间密、两头疏的形状,中间部位的注入干气物质的量分数变化幅度最大。运动方程不考虑重力项,计算的气体垂向速度较小,则注入干气在垂向上不易发生超覆,垂向上的受力和扩散情况对注入干气超覆有较大影响。

(2)储层渗透率、储层厚度和注采压力比是注入干气超覆较为敏感的影响因素,利用注入干气通过储层某一垂直截面处顶部底部物质的量分数差 f 表征注入干气超覆强弱,渗透率提升3倍, f 降低了41.8%,随着储层渗透率增加,注入干气超覆强度降低;储层厚度减少50%, f 降低73.4%,减少储层厚度可明显降低注入干气超覆;当注采压力比由1.05增加到1.15时, f 降低了72.9%,注采压力比的增加导致注入干气在水平方向的运移能力增强而不易超覆。储层厚和渗透率低的小层更易超覆,建议循环注气方案尽量选取较高的注采压力比,以降低注入干气的超覆。

参考文献:

- [1] JESSEN K, ORR F M. Gas cycling and the development of miscibility in condensate reservoirs [R]. SPE-8470-PA, 2004.
 - [2] SADOONI M, ZONNOURI A. The effect of nitrogen injection on production improvement in an Iranian rich gas condensate reservoir [J]. Liquid Fuels Technology, 2015, 33(4): 422-429.
 - [3] ADEL H, TIAB D, ZHU T. Effect of gas recycling on the enhancement of condensate recovery, case study: Hassi R ' Mel south field, Algeria [R]. SPE-104040-MS, 2006.
 - [4] 李士伦, 孙雷, 郭平, 等. 再论我国发展注气提高采收率技术 [J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 30-34.
- LI Shilun, SUN Lei, GUO Ping, et al. Re-discussion of EOR with gas injection in china [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 30-34.

- [5] GHIRI M N, NASRIANI H R, SINAIEI M, et al. Gas injection for enhancement of condensate recovery in a gas condensate reservoir[J]. *Energy Sources*, 2015,37(8): 799-806.
- [6] LINDERMAN J, AL-JENAIBI F, GHORI S, et al. Feasibility study of substituting nitrogen for hydrocarbon in a gas recycle condensate reservoir[R]. SPE-117952-MS, 2008.
- [7] 郭平,李士伦,孙雷,等.不同注入气对凝析气相态的影响[J]. *新疆石油地质*,2001,22(3):244-246.
GUO Ping, LI Shilun, SUN Lei, et al. Effect of different injection gas on condensate gas phase state[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2001,22(3):244-246.
- [8] 李玉冠,张兴林,王新裕,等.新疆柯克亚凝析气田循环注气调整措施与开发效果[J]. *天然气工业*,2000,20(4):61-62.
LI Yuguan, ZHANG Xinglin, WANG Xinyu, et al. Adjustment measures of circulating gas injection in Kekeya condensate gas field in Xinjiang province and its development effectiveness[J]. *Natural Gas Industry*, 2000,20(4):61-62.
- [9] 杨胜来,陈浩,冯积累,等.塔里木油田改善注气开发效果的关键问题[J]. *油气地质与采收率*,2014,21(1):40-44.
YANG Shenglai, CHEN Hao, FENG Jilei, et al. A brief discussion on some scientific issues to improve oil displacement during gas injection, Tarim Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014,21(1):40-44.
- [10] 朱卫红,张芬娥,唐明龙,等.牙哈凝析气田循环注气延缓气窜的方法[J]. *天然气工业*,2008,28(10):76-77.
ZHU Weihong, ZHANG Fen'e, TANG Minglong, et al. Methods of cyclic gas injection to retard gas channeling in the Yaha condensate gas field[J]. *Natural Gas Industry*, 2008,28(10):76-77.
- [11] ROSSEN W R, DUIJN C J V. Gravity segregation in steady-state horizontal flow in homogeneous reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2004,43(1):99-111.
- [12] JAMSHIDNEZHAD M, GHAZVIAN T. Analytical modeling for gravity segregation in gas improved oil recovery of tilted reservoirs[J]. *Transport in Porous Media*, 2011,86(3):695-704.
- [13] 霍进,贾永禄,余佳,等.考虑重力超覆的稠油热采试井分析模型研究[J]. *西南石油大学学报*,2006,28(2):52-55.
HUO Jin, JIA Yonglu, YU Jia, et al. Well test method in heavy oil thermal recovery with consideration of gravity override[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006,28(2):52-55.
- [14] 焦玉卫,李保柱,王博,等.凝析气藏循环注气驱替机制研究[J]. *新疆石油天然气*,2010,6(4):63-66.
JIAO Yuwei, LI Baozhu, WANG Bo, et al. Research on mechanisms of cycling reinjection in gas-condensate reservoir[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2010,6(4):63-66.
- [15] 赵元良,蒋智格,葛盛权,等.井下流体组分分析注气扫描应用实例[J]. *测井技术*,2015,39(3):379-383.
ZHAO Yuanliang, JIANG Zhige, GE Shengquan, et al. On gas injection monitoring by downhole fluids composition analysis[J]. *Well Logging Technology*, 2015,39(3):379-383.
- [16] 张利明,谢伟,杨建全,等.凝析气藏循环注气开发中后期重力分异特征[J]. *大庆石油地质与开发*,2016,35(1):120-125.
ZHANG Liming, XIE Wei, YANG Jianquan, et al. Gravity segregation of the cyclic gas injection in the condensate gas reservoirs in the middle and late development stages[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2016,35(1):120-125.
- [17] AYALA L F, ERTEKIN T, ADEWUMI M A. Compositional modeling of retrograde gas-condensate reservoirs in multi mechanistic flow domains [R]. SPE-94856-PA, 2006.
- [18] 余军.凝析气藏数值模拟相态分析研究及应用[J]. *天然气勘探与开发*,2004,27(1):39-45.
SHE Jun. The study and application of numerical simulation and phase analyses to condensate gas reservoir [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2004,27(1):39-45.
- [19] 郭平,涂汉敏,汪周华,等.多组分气—气扩散系数的计算[J]. *天然气工业*,2015,35(8):39-43.
GUO Ping, TU Hanmin, WANG Zhouhua, et al. Calculation of multi-component gas-gas diffusion coefficient[J]. *Natural Gas Industry*, 2015,35(8):39-43.
- [20] KRISHNA R. A generalized film model for mass transfer in non-ideal fluid mixtures[J]. *Chemical Engineering Science*, 1977,32(6):659-667.
- [21] GHORAYEB K, FIROOZABADI A. Molecular, pressure, and thermal diffusion in nonideal multicomponent mixtures[J]. *AIChE Journal*, 2000,46(5):883-891.
- [22] NAJAFI H S, EDALATPANAH S A. On the modified symmetric successive over-relaxation method for augmented systems[J]. *Computational & Applied Mathematics*, 2014,34(2):1-11.