

注 CO₂ 井筒相态分布模型的建立

赵华鹤¹ 徐 宁^{1,2} 管坐攀¹ 刘福贺¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为了模拟注 CO₂ 井筒相态分布,为注 CO₂ 驱油提供理论依据,节省测井成本,提高驱油效率,建立了注 CO₂ 井筒相态分布模型。本文基于传热学、流体力学、能量守恒定律等理论方法,建立了井筒温度压力耦合模型,然后结合 CO₂ 相态变化图,绘制井筒相态分布图,最后基于 MATLAB 编制了便于操作的图形用户交互界面程序。将本文建立的注 CO₂ 相态分布模型应用于油田实验井,通过与现场监测得出的温度和压力数据曲线进行对比,得出平均测量点与本文模型计算点总的平均相对误差,温度平均相对误差为 0.75%,压力平均相对误差为 3.2%。基本满足注 CO₂ 井筒相态分布模型建立的精度要求,能够指导注 CO₂ 驱油井实际生产,优化井口注入参数,提高驱油效率。

关键词: 注 CO₂; 井筒; 温度模型; 压力模型; 相态分布

中图分类号: TE355.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Establishment of phase distribution model for CO₂ injection wellbore

Zhao Huahe¹ Xu Ning^{1,2} Guan Zuonian¹ Liu Fuhe¹

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to simulate phase distribution for carbon dioxide injection wellbore, provide theoretical basis for carbon dioxide flooding, save cost on well logging, improve oil recovery efficiency, the phase distribution model was established for carbon dioxide injection wellbore. This paper established the temperature and pressure coupled model along the wellbore, based on the theory of heat transfer, fluid mechanics and energy conservation law. Then the phase distribution map for carbon dioxide injection wellbore can be drawn combined with carbon dioxide phase diagram. At last, the graphical user interface has been composed based on the MATLAB program for the convenience of the user. The phase distribution model which was established by this paper for carbon dioxide injection wellbore was applied to a test well. Through the comparison of data of temperature and pressure between monitoring and simulating, the relative average errors between measuring points and calculating points were obtained. The relative average temperature error was 0.75% and the relative average pressure error was 3.2%. It can mainly satisfy the requirements of accuracy for establishment of phase distribution model for carbon dioxide injection wellbore. The model can conduct production of carbon dioxide flooding, optimize the injection parameters and increase oil recovery efficiency.

Keywords: carbon dioxide injection; wellbore; temperature model; pressure model; phase distribution

1 引言

目前注 CO₂ 驱油技术已经成为油田三次采油中一个重要的驱油手段^[1-2],CO₂ 驱油提高原油采收率的主要机理有^[3]:使原油体积膨胀、降低原油黏度、改善油水流动度比、萃取原油中的轻质烃类、溶解气驱作用和降低界面张力等。若井下 CO₂ 处于超临界态则能与原油实现混相,使得其界面张力降为零,成为混相驱,理论上可使采收率达到 100%。因此 CO₂ 混相驱油成为 CO₂ 驱油技术的一项重要驱油工艺,若想使原油与 CO₂

流体达到混相状态,就要求 CO₂ 处于超临界态。因此 CO₂ 流体到达井下油层段的相态对于驱油效果具有很大的影响。但是由于目前油田 CO₂ 驱井下相态分布缺少理论依据,井口注 CO₂ 参数仅靠操作人员凭经验进行设置,无法精准地控制井下 CO₂ 的相态分布,也就不能使超临界 CO₂ 流体合理地覆盖油层段,导致油田注 CO₂ 驱油效率低下,三次开采驱油效果不显著。因此为了工程需求,本文建立了注 CO₂ 井筒相态分布模型,以此来预测井下 CO₂ 流体相态分布,为井口 CO₂ 注入参数的优化设置提供理论指导。

2 CO₂ 相态判定

如图1显示了CO₂随着温度、压力的变化而发生相态变化的过程,叫做CO₂相变图。由图可以看出,CO₂流体的相态变化主要取决于温度和压力这两个参数,CO₂的临界温度为31.04℃、临界点压力为7.38MPa,当温度和压力超过该临界点,CO₂就进入了超临界状态。

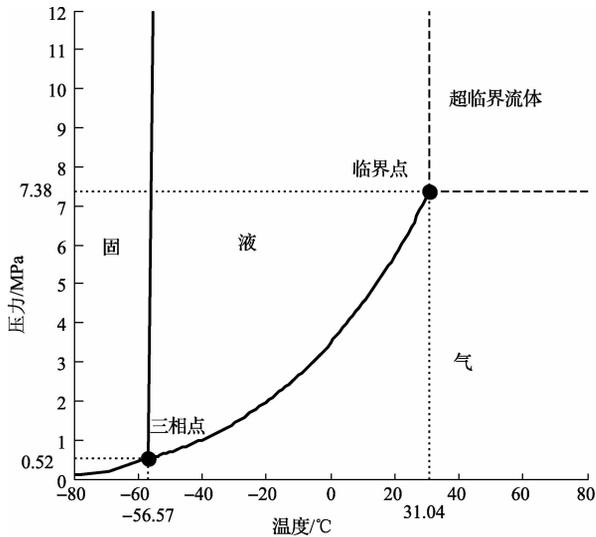


图1 CO₂相态变化

本文基于传热学理论、流体力学原理、能量守恒定律和化工物性计算方法,根据液态CO₂在竖直井筒中的热量传递原理和流体流动理论,建立了液态CO₂井筒温度和压力数值模型,将数值模型应用前向差分进行离散化,利用迭代方程、循环求解的方法,编制了MATLAB迭代程序,结合CO₂相变图,从而得出注CO₂井筒相态分布图。

3 井筒相态分布模型的建立

3.1 基本假设

在注CO₂流体的过程中,周围大地到水泥环外壁、水泥环外壁到水泥环内壁、套管外壁到套管内壁、油管外壁到油管内壁的热量传递方式为热传导;油管内壁与低温CO₂流体之间的热量传递方式为热对流;油套环空内套管内壁与油管外壁之间的热量传递方式为热对流和热辐射。为了便于理论分析和计算方便,在建立注CO₂井筒相态分布模型前,对井筒作如下假设:

- 1)从井口注入的CO₂流体温度、压力和速度为恒定值;
- 2)井筒内油管、套管和水泥环的结构如图2所示;
- 3)周围大地到水泥环外缘的传热为一维非稳态传热;水泥环外缘到油管内CO₂流体所经过的两次热量传递过程为一维稳态传热;
- 4)地温梯度恒定,地层温度是深度的线性函数,为0.035 7℃/m;

5)将地层导热系数视为是恒定不变量;

6)油套环空内为空气。

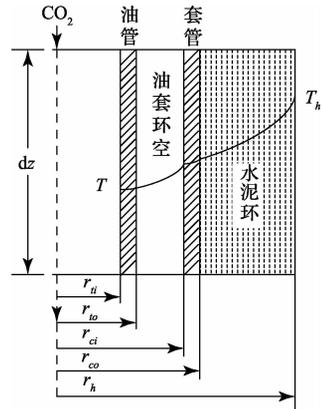


图2 井筒微元段结构

3.2 井筒温度模型^[4-8]

注CO₂过程中,设井筒中径向热流量为 Φ_s ,即为井筒微元段内低温CO₂流体所吸收的热量,井筒微元段热量径向传递示意图如图3所示。

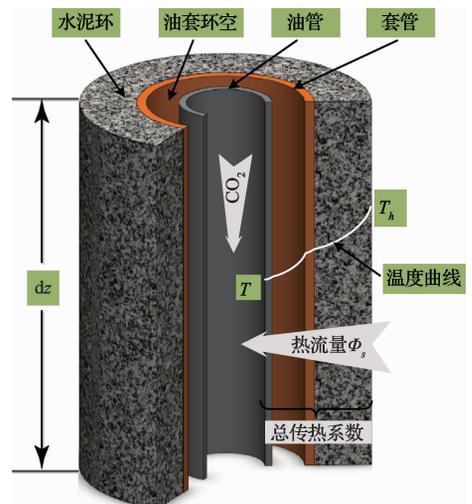


图3 井筒热量径向传递

由传热学原理中圆筒壁的传热公式可知,在稳定热流状态下,井筒微元段内的径向热流量 Φ_s 等于单位时间内单位质量CO₂流体吸收的热量,由此可以得到:

$$\Phi_s = WCdT = 2\pi r_{oi}U(T_h - T)dz \quad (1)$$

注CO₂过程中,周围地层到水泥环外缘的热量传递是不稳定的,其径向热流量随注入时间是变化的,即为一维非稳态传热,其径向热流量为:

$$\Phi_s = \frac{2\pi k_e(ax + b - T_h)}{\ln\left(\frac{2\sqrt{at}}{r_h}\right) - 0.29} dz \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得到:

$$\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{A} - \frac{(ax + b)}{A} = 0 \quad (3)$$

$$A = \frac{WC \left\{ k_c + r_{co} U \left[\ln \left(\frac{2 \sqrt{at}}{r_h} \right) - 0.29 \right] \right\}}{2 \pi r_{co} U k_c}$$

在井口处($z=0$),设CO₂流体的注入温度为 T_0 ,求解微分方程(3),可得到:

$$T = az + b - aA + [T_0 + aA - b]e^{-z} \quad (4)$$

上式即为注CO₂井筒温度模型,由于模型求解需要考虑CO₂物性参数随温度和压力的变化,因此温度模型与压力模型需要相互迭代求解。

3.3 井筒压力模型

对于井筒微元段内的CO₂流体,应用能量守恒方程,推导出注CO₂井筒微元段内压力梯度表达式:

$$\frac{dP}{dz} = \rho g \sin \theta - \rho V \frac{dV}{dz} - \frac{\rho V^2}{4r_{ii}} \quad (5)$$

求解上式微分方程,就能得出各个节点的压力值,从而得出井筒压力分布曲线。由式(5)可知,压力梯度由流体重力损失、加速度损失和摩擦阻力损失3个部分组成。加速度损失主要是由流体速度的改变而引起,由于假设CO₂注入速度为恒定值,因此加速度损失可以忽略。为保证计算的精度,模型中需考虑CO₂物性参数随温度和压力发生的变化。

3.4 基于MATLAB相态分布图的实现^[9-10]

将上文推导出的注CO₂井筒温度与压力模型,使用前向差分进行离散化,并且将井筒在深度方向划分成 n 段,设其间隔为 dz ,编制MATLAB迭代计算程序。首先输入初始参数,由以上各参数计算下一个节点的CO₂温度、压力等参数,然后按照上述步骤重复迭代计算,就能得到井筒温度和压力曲线,最后结合CO₂相变图,绘制出直观的井下CO₂相态分布如图4所示。

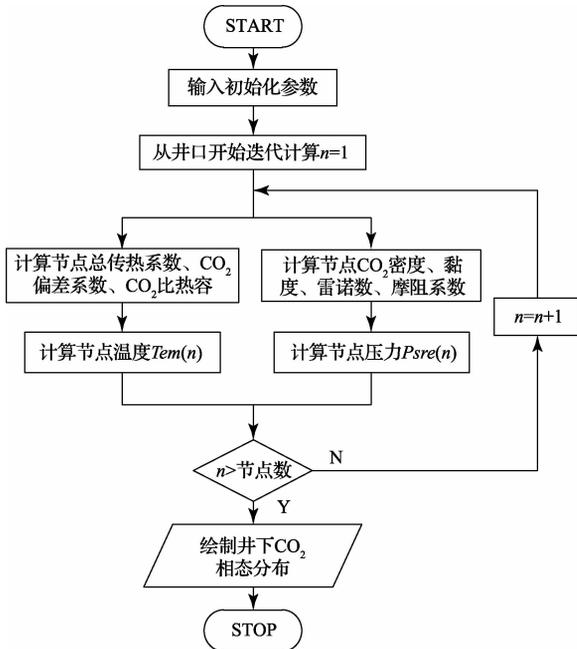


图4 MATLAB迭代计算程序

为了更好地体现程序的参数化计算特点,编制了基于MATLAB程序的图形用户界面,用户可以针对不同注CO₂井口的实际情况,输入具体井口尺寸、注入参数、计算节点等参数,此图形用户界面程序(图5)能够直观的输出井筒温度、压力分布曲线以及井筒相态分布图。

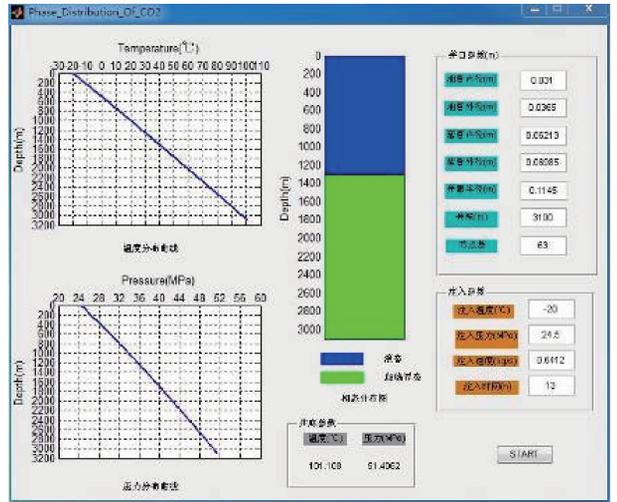


图5 MATLAB图形用户界面

4 模型相关参数计算方法

4.1 井筒微元段总传热系数

由传热学中多层圆筒壁的传热理论可以计算出井筒微元段总传热系数 U 的表达式为:

$$U = \left[\frac{r_o \ln \frac{r_h}{r_{co}}}{\lambda_{em}} + \frac{r_o \ln \frac{r_{co}}{r_{ci}}}{\lambda_{as}} + \frac{1}{h_c + h_r} + \frac{r_o \ln \frac{r_{co}}{r_{ti}}}{\lambda_{ob}} + \frac{r_o}{r_n h_f} \right]^{-1} \quad (6)$$

式中: h_f 和 h_r 值可分别根据Dittus-Boelter方程和Stefan-Boltzmann方程计算; h_c 值可根据Dropkin-Somerscales方程计算。井筒总传热系数与注入流体温度、井身结构及其材料有关。由于上式 h_f 、 h_r 和 h_c 等参数与油管及CO₂流体物性参数有关,在具体计算 U 时,需将井身分成多段,在每一段上根据不同的温度和压力采用迭代法求解。

4.2 比热容

对于CO₂流体比热容数值的计算,由理化数据手册可知,实际气体比热容与理想气体比热容有如下关系式:

$$C = C_p^0 + \Delta C_p \quad (7)$$

其中理想气体热容 C_p^0 是温度的单一函数,通常通过经验关系式就可以求得, ΔC_p 为恒压热容差,其值由焓差的偏微商来确定,为了便于程序计算,采用PR(Peng-Robinson)状态方程来推导焓差的偏微商,计算求得CO₂的理想气体热容 C_p^0 与恒压热容差的值 ΔC_p ,最终代入式(7)就可以计算出不同温度压力下CO₂流体的实际比热容,如图6所示。

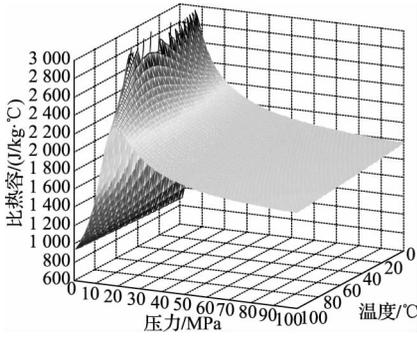


图 6 不同温度压力下 CO₂ 的比热容

4.3 密度

根据理想气体状态方程,考虑 CO₂ 的偏差系数,CO₂ 的密度表示为:

$$\rho = \frac{PM}{ZRT} \quad (8)$$

Z 为 CO₂ 的偏差系数,由于 RK(redlich-kwong) 状态方程是目前公认最为准确的计算偏差系数的二常数气体状态方程式,适用的温度和压力范围较广,因此井筒中 CO₂ 流体偏差系数的计算可采用 RK 状态方程,RK 方程的偏差系数 Z 的三次方程形式为:

$$Z^3 - Z^2 + (A - B - B^2)Z - AB = 0$$

$$A = \frac{0.4278P_r}{T_r^{2.5}}, B = \frac{0.0867P_r}{T_r} \quad (9)$$

将井筒计算节点的温度和压力值代入以上各式中,求解方程(9),计算出此温度与压力下 CO₂ 流体的偏差系数值,然后将计算得出的 CO₂ 偏差系数值代入式(8),就能够得出计算节点处 CO₂ 流体的密度值(图 7)。

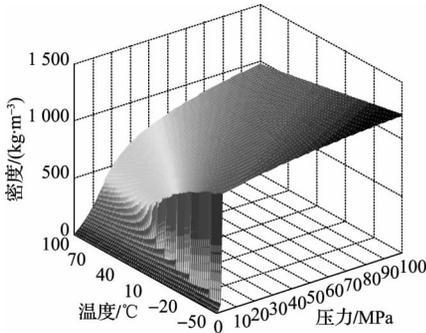


图 7 不同温度压力下 CO₂ 的密度

4.4 摩擦系数

摩擦系数是计算井筒中由于流体与管壁摩擦而产生的摩擦阻力梯度的关键参数,对于摩擦系数的计算,采用经验公式,式(10):

$$\lambda = \frac{1}{\left[1.14 - 2 \lg \left(\frac{e}{2r_{ii}} + \frac{21.25}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (10)$$

摩擦系数代表油管内流体流动过程中摩擦损失的大

小,其值与流体雷诺数 Re、油管平均粗糙度 e 和油管内径 r_{ii} 有关,其中雷诺数为:

$$\text{Re} = \frac{2\rho v r_{ii}}{\mu} \quad (11)$$

CO₂ 流体流速 v 的表达式如下:

$$v = \frac{W}{(\rho\pi r_{ii}^2)} \quad (12)$$

对于井筒微元段 CO₂ 黏度 μ 的计算一般采用基于 PR (peng-robinson) 状态方程的黏度模型,将井筒微元段内节点处 CO₂ 流体的温度与压力值代入黏度计算模型中,就能够计算得出井筒微元段内 CO₂ 流体的黏度值,如图 8 所示。

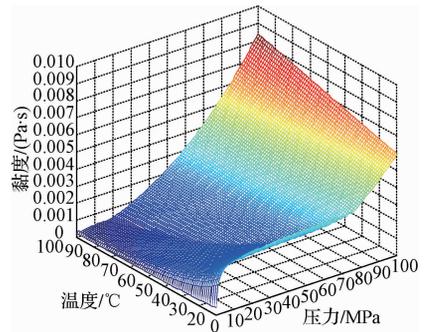


图 8 不同温度压力下 CO₂ 的黏度

5 方法应用

以吉林油田注 CO₂ 井为实验井,实验井现场施工储罐内液态 CO₂ 的温度为 -20℃,压力为 2 MPa。注入系统最终经过注入泵加压至 20 MPa 后,以 40t/d 的速度注入到 2 300 m 的地层中,环空为空气,油管为 2- $\frac{7}{8}$ " 直径,套管为 7"N80 套管,固井水泥环直径 240 mm。由于液态 CO₂ 具有较大的压缩性,当 CO₂ 液体受到压缩时,其温度有所升高,根据实验确定其升高幅度约为 0.3℃/MPa,因此注入的 CO₂ 流体在井口的实际温度为:

$$t_0 = t_s + 0.3 \times (P_w - P_s) = -20 + 0.3 \times (20 - 2) = -14.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

井筒温度和压力模型计算基本参数为:油管内径 0.031 m,油管外径 0.036 51 m,套管内径 0.080 85 m,套管外径 0.088 9 m,井眼半径 0.12 m,井深 2 300 m,油、套管导热系数 56.5 W/(m·K),水泥环导热系数 0.35 W/(m·K),油套环空自然对流系数 6.24 W/(m²·K)。油套环空辐射散热系数 5.17 W/(m²·K),地面温度 20℃,地温梯度 0.035 7 K/m。

5.1 井筒温度模型验证

将注 CO₂ 井口尺寸参数、热力学参数和注 CO₂ 参数代入井筒相态分布 MATLAB 计算程序中,经过迭代计算得出井筒理论温度梯度曲线,将现场测量温度曲线也绘制在

图中,用滤波算法平滑噪声数据,且在图9中做出地层温度梯度曲线作为对比。

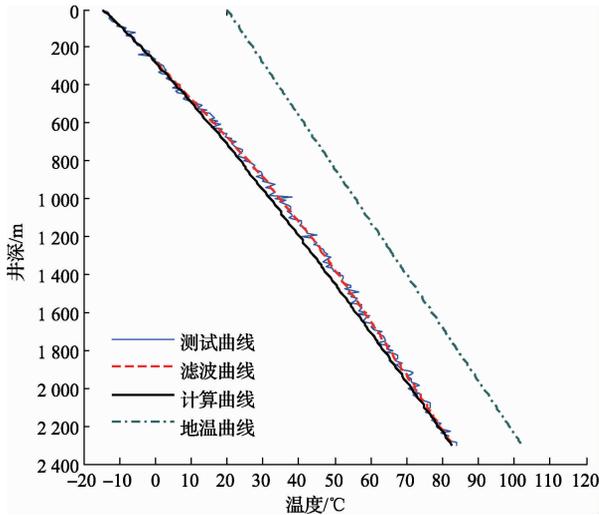


图9 温度模型验证曲线

在图9中,经过MATALB迭代计算得到的井筒温度梯度曲线与现场测量得到的井筒温度梯度曲线的对比,可以看出二者符合较好,但是在1000~1600m的范围内计算结果误差较大,温度最大偏差为2.5℃,误差为4.3%,其他区域误差在0.2~2.5℃,总体误差较小。

5.2 井筒压力模型验证

将注CO₂井口尺寸参数、热力学参数和注CO₂参数代入井筒相态分布MATLAB计算程序中,经过迭代计算得出井筒理论压力梯度曲线,将现场测量压力曲线也绘制在图10进行对比。

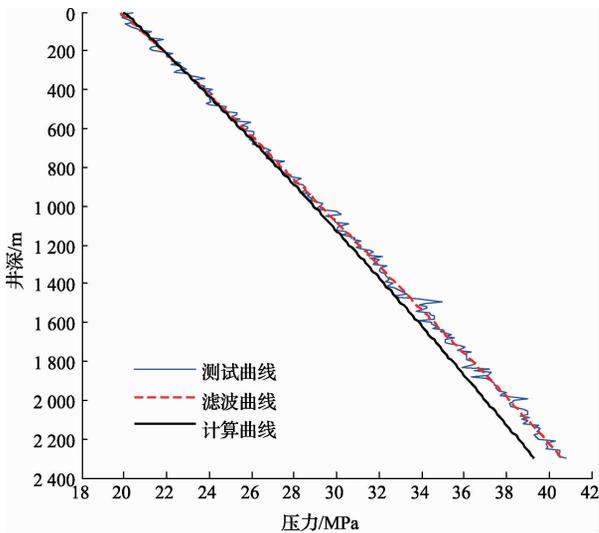


图10 压力模型验证曲线

在图10中,经过MATALB迭代计算得到的井筒压力梯度曲线与现场测量得到的井下压力梯度曲线的对比,可

以看出二者符合较好,最大偏差为1.3MPa,误差为3.2%,总体误差较小,说明本文建立的模型是正确的,可以为注CO₂工程提供理论指导。

5.3 井筒相态分布图分析

将试验井井口参数和注CO₂参数代入本文建立注CO₂井筒相态分布MATLAB计算程序中,设置计算节点间隔为10m,经过程的迭代计算,绘制出注CO₂井下相态分布如图11所示。

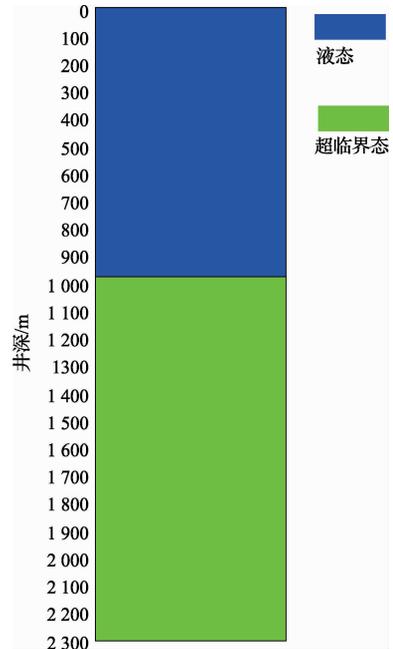


图11 CO₂相态分布

由图11可以看出,井筒中CO₂主要呈液态和超临界态,CO₂在井筒中会直接从液相区进入到超临界区域,对于试验井现场测试的监测结果显示,井下CO₂相态分界面为950m处,应用本文建立的模型计算结果为980m处,其相对误差为3.1%,进一步验证了本文多建立的注CO₂驱井下相态分布数值模型的准确性。

6 结 论

基于传热学理论,应用能量守恒定律,建立了注CO₂驱井筒相态分布模型,并且对此模型进行离散化,根据离散化的数值模型编制了MATLAB迭代计算程序以及图形用户界面,应用此程序输入CO₂注入温度、压力、速度等参数,就能计算得出井筒CO₂温度与压力分布曲线,并与现场监测得到的温度压力数据进行比较,得出平均测量点与本文模型计算点总的平均相对误差,温度平均相对误差为0.75%,压力平均相对误差为3.2%,说明本文所建立的模型是准确可靠的。应用此模型可以预测井下CO₂的相态分布,从而可以通过优化井口注入参数,使超临界CO₂流体合理的覆盖油层段,达到高效经济驱油的目的,为提高

CO₂ 驱油效率提供了理论依据,具有较高的实际应用价值。

符号说明:

- a ——地温梯度, K/m;
 b ——地面平均温度, K;
 C ——CO₂ 的比热容, J/(kg·K);
 e ——绝对粗糙度;
 g ——重力加速度, 9.8m/s²;
 h_c ——油套环空内对流换热系数, W/(m²·K);
 h_f ——CO₂ 对流换热系数, W/(m²·K);
 h_r ——油套环空内辐射传热系数, W/(m²·K);
 k_e ——地层的热传导率, W/(m·K);
 M ——CO₂ 摩尔质量, 取 0.044 01kg/mol;
 P ——井筒该点处的压力, Pa;
 P_c ——CO₂ 临界压力, $P_c = 7.38$ MPa;
 P_r ——对比压力, $P_r = \frac{P}{P_c}$;
 r_{ci} ——套管内径, m;
 r_{co} ——套管外径, m;
 r_h ——水泥环半径, m;
 r_{ti} ——油管内径, m;
 r_{to} ——油管外径, m;
 R ——气体常数, 8.314472J/(K·mol);
 Re ——雷诺数, 无因次量;
 t ——注 CO₂ 时间, h;
 T ——油管中 CO₂ 流体的温度, K;
 T_c ——CO₂ 临界温度, $T_c = 304.19$ K;
 T_{ci} ——套管内表面温度, K;
 T_{co} ——套管外表面温度, K;
 T_h ——水泥环与地层交界面的温度, K;
 T_r ——对比温度, $T_r = \frac{T}{T_c}$;
 T_{ti} ——油管内表面温度, K;
 T_{to} ——油管外表面温度, K;
 U ——微元段井筒总传热系数, W/(m²·K);
 v ——注入 CO₂ 在油管中的流速, m/s;
 W ——CO₂ 流体注入速度, kg/s;
 z ——垂向距离, m;
 Z ——CO₂ 偏差系数, 无因次;
 α ——地层热扩散系数, m²/h;
 θ ——井筒轴线与水平方向的夹角;

- ρ ——CO₂ 流体的密度, kg/m³;
 μ ——CO₂ 流体黏度, Pa·s;
 λ ——CO₂ 流体摩阻系数, 无因次;
 λ_{cas} ——套管导热系数, W/(m·K);
 λ_{cem} ——水泥环导热系数, W/(m·K);
 λ_{tub} ——油管导热系数, W/(m·K)。

参考文献

- [1] 程宇雄, 李根生, 王海柱, 等. 超临界 CO₂ 喷射压裂孔内增压机理[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 550-555.
- [2] 程宇雄, 李根生, 沈忠厚, 等. 超临界 CO₂ 射流冲击压力参数影响规律[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 765-770.
- [3] 鞠斌山, 秦积舜, 李治平, 等. CO₂-原油体系最小混相压力预测模型[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 274-277.
- [4] 李波, 王军磊, 宁波, 等. 气井井筒温度、压力与积液综合预测模型[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(4): 64-70.
- [5] 颜华, 王善辉, 周英钢. 正则化参数自适应选取的声学 CT 温度场重建[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1301-1307.
- [6] 彭俊, 王建辉, 谭帅, 等. 回转窑热工过程仿真与球团平均停留时间的研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2491-2498.
- [7] 马占龙, 王高文, 张健, 等. 基于有限元及神经网络的磨削温度仿真预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11): 1080-1085.
- [8] 阚哲, 孟国营, 王晓蕾, 等. 基于遗传算法的炉膛温度场重建算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1149-1154.
- [9] 郭书明, 韩恩典, 练峰海. MATLAB 在分析调制中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(3): 75-78.
- [10] 徐宁. 基于光纤传感的 CO₂ 驱井下相态分布研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

作者简介

赵华鹤, 工学硕士, 研究实习员。主要研究方向为航空光电成像与测量结构设计等。

徐宁(通讯作者), 博士研究生, 研究实习员。主要研究方向为光电探测成像结构设计和优化分析等。

E-mail: xuninghit@163.com