

超临界 CO₂ 钻井井筒内流动参数变化规律

孙宝江¹, 孙小辉¹, 王志远¹, 王金堂¹, 刘书杰², 夏 强², 蔡德军³

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中海油研究总院, 北京 100028;

3. 中国石油集团海洋工程有限公司钻井事业部, 天津 300280)

摘要: 优选适用于超临界 CO₂ 钻井井筒温度和压力条件下的 CO₂ 物性参数计算方法, 基于井筒中 CO₂ 的物性变化规律, 以比焓为研究对象, 建立超临界 CO₂ 钻井井筒流体流动控制方程组, 分析超临界 CO₂ 流体物性参数变化对井筒内流动规律的影响。计算结果表明: 在超临界 CO₂ 钻井井筒温度和压力条件下, 采用 Span-Wagner 方法和 V-W 方法计算 CO₂ 的物性参数平均计算误差最小, 分别在 0.5% 和 1.5% 以内, 相对于其他方法计算精度更高; 随井深的增加, 钻杆内和环空中 CO₂ 密度、黏度和导热系数逐渐减小, 比热容先增大后减小; 受物性参数变化的影响, 环空流体流速和动能沿井深逐渐增大, 携岩能力逐渐增强, 流体压力沿井深的变化趋势呈非线性; 忽略密度、黏度、比热容、导热系数等物性参数的变化会导致 CO₂ 携岩能力、井底压力和井筒温度分布的计算误差, 算例中各误差分别在 10.7%、7.9% 和 1.1% 以内。

关键词: 钻井; 超临界二氧化碳; 热物性参数; 携岩能力; 温度和压力分布

中图分类号: TE 29 **文献标志码:** A

引用格式: 孙宝江, 孙小辉, 王志远, 等. 超临界 CO₂ 钻井井筒内流动参数变化规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 88-95.

SUN Baojiang, SUN Xiaohui, WANG Zhiyuan, et al. Flow behavior analysis during supercritical CO₂ drilling: consideration of varying thermo-physical properties of CO₂ in wellbore[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 88-95.

Flow behavior analysis during supercritical CO₂ drilling: consideration of varying thermo-physical properties of CO₂ in wellbore

SUN Baojiang¹, SUN Xiaohui¹, WANG Zhiyuan¹, WANG Jintang¹, LIU Shujie², XIA Qiang², CAI Dejun³

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China;

3. Drilling Division, CNPC Offshore Engineering Company Limited, Tianjin 300280, China)

Abstract: In order to calculate the thermo-physical parameters of CO₂ in wellbore under varying pressure and temperature conditions, the governing flow equations of fluids in wellbore were established based on specific enthalpies, in which the variations of the thermo-physical properties of supercritical (SC) CO₂ and their influence on fluid flow can be studied. The results of case studies show that the average errors using the Span-Wagner and V-W equations for calculating CO₂'s properties are within 0.3% and 1.5%, respectively, which are better than other methods in the temperature-pressure range considered during SC-CO₂ drilling. The density, viscosity and thermal conductivity of CO₂ in wellbore decrease with the depth increasing, while its heat capacity increases firstly, and then declines. Because the variation of thermo-physical properties CO₂ along the wellbore, the velocity, kinetic energy of the fluid, and its cuttings carrying capability increase from wellhead to bottom hole, and the borehole pressure varies nonlinearly

收稿日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104172, U1262202); 中央高校基本科研业务费专项(15CX06020A); 中海石油(中国)有限公司综合科研项目(YXKY-2015-ZY-12)

作者简介: 孙宝江(1963-), 男, 长江学者特聘教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为油气井工程与流体力学、海洋石油工程。E-mail: sunbj@upc.edu.cn。

along the wellbore. The accuracy of the flow behavior analysis for SC-CO₂ can be greatly improved via considering its variable thermo-physical properties in wellbore, otherwise, errors over 10.7%, 7.9% and 1.1% can be raised when calculating the cuttings carrying capability, bottom hole pressure and wellbore temperature distribution, respectively.

Keywords: drilling; supercritical CO₂; thermo-physical properties; cuttings carrying capability; temperature and pressure distribution

超临界 CO₂ (SC-CO₂) 是温度大于临界温度 (314.3 K)、压力大于临界压力 (7.37 MPa) 的 CO₂。随着钻井技术的发展, SC-CO₂ 在钻井工程中的应用引起了广泛关注^[1-4]。SC-CO₂ 钻井是利用 CO₂ 作为钻井液, 在循环过程中清洗井眼、平衡地层压力, 同时在井底处达到超临界态, 实现较高的破岩效率。与水和空气等钻井液不同, CO₂ 循环过程中其自身的物性参数存在较大变化, 物性参数的变化会对井筒内钻井液的携岩速度、压力、温度等参数产生一定影响。要解决 SC-CO₂ 钻井过程中的携岩、控压钻进、水合物预测等问题, 须对井筒内 CO₂ 的物性变化规律进行研究。笔者通过计算对比, 优选适用于 SC-CO₂ 钻井井筒温度和压力条件下的 CO₂ 物性参数计算方法, 即 Span-Wagner 方法和 V-W 方法, 建立 SC-CO₂ 钻井井筒流体流动控制方程组, 分析 CO₂ 物性参数变化对 SC-CO₂ 钻井井筒内流体流动规律的影响。

1 CO₂ 物性参数计算

为了研究井筒内 CO₂ 物性参数变化对流动参数的影响, 须对 SC-CO₂ 钻井温度和压力条件下的 CO₂ 物性参数计算方法进行优选。考虑钻井井深在 3000 m 以内, 地层温度梯度和压力梯度分别为 0.03 K/m 和 0.01 MPa/m, 井口回压为 5 MPa, CO₂ 注入温度在 253.15 K 以上, 环空返出温度在 293.15 K 以下。在以上温度和压力条件下, 对 CO₂ 的物性参数计算方法进行对比和优选。

1.1 密度、比热容和焓

PVT 气体状态方程描述了气体的容积特性, 是计算气体热物性参数的一种最常用的方法。常用的方程形式包括 PR 方程、SPK 方程、BWRS 方程等^[5-6], 利用亥姆霍兹能方程是另一种计算气体热物理性质的方法, 该方法对密度、比热容、焓等热物性参数进行同步拟合, 保证了各个热力学参数的热力学统一性。

Span-Wagner 方法^[7] 是一种基于亥姆霍兹能方程进行 CO₂ 热物性计算的常用方法, 它直接从能量方程入手, 提高了计算精度。据文献报道^[8], Span-Wagner 方法对于密度、比热容等物性参数的计算误差最小, 在 2% 以内。以 NIST 的标准数据值^[9] 为参

照, 在 SC-CO₂ 钻井温度和压力条件下, 对以上几种 CO₂ 热物性参数计算方法进行计算和对比。通过计算得到 DPR、DAK、Cranmer、PR、SPK、BWRS 和 Span-Wagner 方法密度平均计算误差分别为 12.83%、13.34%、40.54%、8.01%、11.48%、10.15% 和 0.11%。另外, Span-Wagner 方法的比热容和焓的平均计算误差分别为 0.29% 和 0.04%, 其他方法的计算误差较大。在 SC-CO₂ 钻井井筒温度和压力条件下, 采用 Span-Wagner 方法计算 CO₂ 的密度、比热容和焓。

1.2 黏度和导热系数

黏度和导热系数是气体另外两个重要的热物性参数。研究表明, PVT 气体状态方程理论无法适用于黏度和导热系数的计算^[10], 目前的计算方法主要采用半经验、半理论的方程形式。对于不同的密度区域, 进行气体黏度和导热系数的计算采用对低压下的黏度和导热系数乘以一定比值或附加残余量两种校正方式。基于校正过程中考虑的因素不同, 主要分为以下几类方法: LGE 法^[11] 的校正过程主要考虑了温度和气体摩尔质量的影响; DS 法、Lucas 法、LBC 法、M-T 法和 Sutton 法^[12-15] 的校正过程主要考虑了温度、摩尔质量、准临界温度和准临界压力的影响; Chung 法^[16-17] 的校正过程除了考虑温度、摩尔质量、准临界温度和准临界压力之外, 还考虑了分子结构参数 (如偏心度、电磁偶距等) 的影响, 具有较高的适用范围和计算精度。

特别地, 针对 CO₂ 气体的黏度和导热系数计算, B-V 法采用多项式进行拟合, 适用范围在 260 ~ 450 K、8 ~ 70 MPa, 计算方法简单。Vesovic 等^[18-19] 提出 V-W 法, 分 3 部分计算 CO₂ 的黏度和导热系数, 包括零密度界限下的初始量、实际密度下的增量和临界点附近的增量, 计算精度高。以 NIST 的标准数据值为参照, 在 SC-CO₂ 钻井温度和压力条件下, 对以上几种 CO₂ 黏度和导热系数的计算方法进行计算和对比。各种计算方法的平均误差如表 1 所示。

通过不同方法的计算结果对比发现, V-W 法计算误差最小, 对 CO₂ 的黏度和导热系数平均计算误差分别为 0.53% 和 1.38%。在 SC-CO₂ 钻井井筒温度和压力条件下, 采用 V-W 法计算 CO₂ 的黏度

和导热系数。

表1 CO₂ 黏度、导热系数的计算方法及计算误差

Table 1 Calculation methods and errors of CO₂ viscosity and thermal conductivity

计算参数	方程名称	作者	平均计算误差/%
黏度	LBC	Lohrenz, Bray 1964	75.25
	DS	Dean, Stiel, 1965	75.68
	LGE	Lee, Gonzalez, 1966	86.66
	Sutton	Sutton, 2005	75.01
	Lucas	Lucas, 1981	7.81
	Chung	Chung, 1980	1.76
	B-V	Bahadori, Vuthaluru, 2009	23.61
	V-W	V. Vesovic, Wakeham, 1990	0.53
导热系数	M-T	Misic, Thodos, 1967	367.50
	B-V	Bahadori, Vuthaluru, 2009	23.15
	Chung	Chung, 1980	20.06
	V-W	V. Vesovic, Wakeham, 1990	1.38

2 SC-CO₂ 钻井井筒流体流动控制方程组

钻井过程中 CO₂ 物性特征的变化必然会影响井筒内流体流动参数的变化。为了研究井筒内 CO₂ 物性参数变化对流动参数的影响,以比焓为研究对象建立 SC-CO₂ 钻井井筒流体流动控制方程组,主要包括温度场和压力场方程。

2.1 温度场方程

考虑 CO₂ 流动过程中的相态及热物性参数变化,以比焓为研究对象,进行 SC-CO₂ 钻井温度场模型推导。假设^[20-21]:①井筒内 CO₂ 进行一维稳态流动;②忽略纵向上的热量传递;③忽略钻头摩擦产生的热量;④不考虑岩屑对井筒内温度压力场的影响;⑤不考虑井筒内 CO₂ 水合物的生成。

钻杆和环空内 CO₂ 稳态流动下,流体的能量守恒方程为

$$\frac{dQ}{dL} = \frac{dh}{dL} + g \cos \theta + v \frac{dv}{dL} \quad (1)$$

式中, Q 为单位质量的流体向外传递的热量, J/kg; h 为单位质量流体的焓, J/kg; v 为流体流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; θ 为井斜角, rad; L 为井筒任意深度, m。

由钻杆流入环空的热量 $Q_{DP \rightarrow A}$ 为

$$dQ = -Q_{DP \rightarrow A} = -\frac{C_{DP}}{\beta_{DP}} (T_{DP} - T_A) dL \quad (2)$$

其中

$$\beta_{DP} = \frac{w C_{DP}}{2\pi r_{DP} U_{DP}}$$

式中, T_{DP} 和 T_A 分别为钻杆和环空内流体的温度,

K ; C_{DP} 为钻杆内流体的比热容, J/(kg · K); w 为流体的质量流速, kg/s。

由环空流入钻杆和地层的热量 $Q_{A \rightarrow DP}$ 和 $Q_{A \rightarrow E}$ 为

$$dQ = Q_{A \rightarrow DP} + Q_{A \rightarrow E} = \frac{C_A}{\beta_A} (T_A - T_{DP}) dL + \frac{C_A}{\alpha} (T_A - T_E) dL \quad (3)$$

其中

$$\beta_A = \frac{w C_A}{2\pi r_{DP} U_{DP}}, \alpha = \frac{C_A w \left(K_e + r_{IC} U_A T_D \right)}{2\pi \left(r_{IC} U_A K_e \right)}$$

式中, T_E 为地层温度, K; C_A 为环空内流体的比热容, J/(kg · K); T_D 为无因次温度; K_e 为地层导热系数, W/(m · K)。

将式(1)和(2)联立,得到环空内的流体温度场隐式方程为

$$T_A = T_{DP} + \frac{\beta_{DP}}{C_{DP}} \left[\frac{dh_{DP}}{dL} + g \cos \theta + \frac{v_{DP} dv_{DP}}{dL} \right] \quad (4)$$

将式(1)、(3)、(4)联立,得到钻杆内的流体温度场隐式方程为

$$T_{DP} = -\frac{\beta_{DP}}{C_{DP}} \left(\frac{\alpha}{\beta_A} + 1 \right) \left(\frac{dh_{DP}}{dL} + g \cos \theta + \frac{v_{DP} dv_{DP}}{dL} \right) + \frac{\alpha}{C_A} \left[\frac{dh_A}{dL} + g \cos \theta + \frac{v_A dv_A}{dL} \right] + T_E \quad (5)$$

式中, h_{DP} 和 h_A 分别为钻杆和环空流体的比焓, J/kg; U_{DP} 和 U_A 分别为钻杆和环空流体的传热系数, J/(m² s · K); r_{DP} 和 r_{IC} 分别为钻杆内径和套管内径, m; v_{DP} 和 v_A 分别为钻杆和环空内流体的流速, m/s。

与 CO₂ 相比,传统水基钻井液循环过程中一般不会发生相变,流体对外膨胀做功以及自身物性参数的变化很小。如果仅以内能为研究对象,忽略流体流动过程中的膨胀做功和机械能变化的影响,对式(4)、(5)进行以下简化,

$$\frac{dh}{dL} + g \cos \theta + v \frac{dv}{dL} \approx \frac{d(CT)}{dL} \approx C \frac{dT}{dL} \quad (6)$$

以上温度场模型即为传统钻井液温度场模型^[22],

$$\frac{dT_A}{dL} = \frac{2\pi r_{DP} U_{DP}}{C_f w} (T_A - T_{DP}) - \frac{2\pi r_w U_A K_f}{C_f w (K_f + r_w U_A T_D)} (T_{ei} - T_A), \quad (7)$$

$$\frac{dT_{DP}}{dL} = \frac{2\pi r_{DP} U_{DP}}{C_f w} (T_A - T_{DP}). \quad (8)$$

2.2 压力场方程

SC-CO₂ 循环过程中密度和黏度变化很大,井筒内流体压力沿井深的变化趋势为非线性。为了保持井底处为欠平衡状态或平衡状态,须对井筒内流体压力场进行准确计算。钻杆和环空内的压力场方程为

$$\frac{dp}{dL} + \rho v \frac{dv}{dL} + \rho g \cos \theta \pm \frac{f \rho v^2}{2d_c} = 0. \tag{9}$$

式中, p 为流体压力, Pa; d_c 为水力直径, m; f 为摩阻系数。

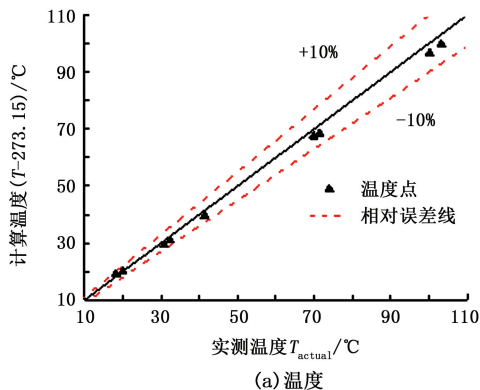
式(9)等号左侧最后一项为摩阻压降项, 钻杆内流体受摩擦力方向与重力方向相反, 符号为负, 环空内符号为正。摩阻系数为管壁特征尺寸和雷诺数的函数, 不同流态下通用的摩阻系数表达式为

$$f = f(Re, \varepsilon, d_c). \tag{10}$$

式中, Re 为雷诺数; ε 为粗糙度, m。

钻具和环空的管壁特征尺寸恒定, CO₂ 摩阻系数的变化主要与雷诺数有关。CO₂ 发生相变后, 密度和黏度随之变化导致 Re 改变, 从而影响其摩阻系数。为了精确计算, 须对不同 Re 范围内 CO₂ 的摩阻系数进行分析。通过室内 CO₂ 管流试验, 对比确定出了不同 Re 下的 CO₂ 摩阻系数计算方法^[23],

$$\begin{cases} f = \frac{64}{Re}, & Re < 2\,300; \\ f = 0.065\,39 \exp\left(-\left(\frac{Re-3\,516}{1\,248}\right)^2\right), & 2\,300 \leq Re \leq 3\,400; \\ \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.34 \lg\left(\frac{\varepsilon}{1.72d_c} - \frac{9.26}{Re} \lg\left(\left(\frac{\varepsilon}{29.36d_c}\right)^{0.95} + \left(\frac{18.35}{Re}\right)^{1.108}\right)\right), & 3\,400 < Re < 2 \times 10^6. \end{cases}$$



3 计算结果验证

关于 SC-CO₂ 钻井, 尚缺少现场实例。采用间接的验证方法对以上 SC-CO₂ 钻井井筒流体流动控制方程组进行改进, 得到注 SC-CO₂ 的井筒温度场方程, 并结合现场试验数据进行验证。

将钻杆内温度场方程进行改进,

$$dQ = Q_{E \rightarrow DP} = \frac{C_f}{\alpha} (T_E - T_f) dL.$$

将式(12)代入式(1)中得到注 CO₂ 的井筒温度场模型为

$$T_f = -\frac{\alpha}{C_f} \left(\frac{dh}{dL} + g \cos \theta + \frac{v dv}{dL} \right) + T_e.$$

苏北溱潼凹陷草舍油田某井于 2005 年 8 月进行了注 CO₂ 试验。注 CO₂ 试验过程中, 沿井筒纵向上不同位置上取 9 个节点, 记录井筒纵向上的温度和压力分布, 井筒参数和试验参数见文献[24], 结果如图 1 所示。井筒内温度和压力计算与实测结果对比显示, 温度计算误差小于 2.7%, 压力计算误差小于 1.4%, 间接验证了建立的 SC-CO₂ 钻井温度和压力场模型计算精度较高。

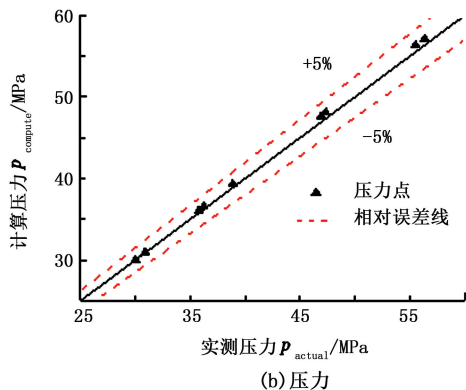


图 1 井筒内 CO₂ 温度、压力的计算与实测结果对比

Fig. 1 Comparison between field data and calculated data of CO₂ temperature and pressure in wellbore

4 算例分析

参考文献[20]中的 SC-CO₂ 试验井参数, 设计 SC-CO₂ 连续油管钻井算例进行计算模拟。算例井基本参数: 施工排量为 2.3 kg/s, 注入温度为 253 K, 循环时间为 10 h, 井口回压为 5.5 MPa, 地面温度为 293 K, 温度梯度为 0.03 K/m, 地层比热容为 837.0 J/(kg · K), 地层导热系数为 2.3 W/(m · K), 水泥环比热容为 880.0 J/(kg · K), 喷嘴水力直径为

6.35 mm, 油套管粗糙度为 0.0005 m, 裸眼粗糙度为 0.0025 m。图 2 为井身结构示意图。

4.1 井筒内 CO₂ 物性参数的变化

4.1.1 密度和流速

图 3 为 CO₂ 的密度和流速随井深的变化曲线。从图 3 中可以看出, 随着井深的增加, CO₂ 的密度逐渐减小, 流速逐渐增大, 但变化趋势逐渐减缓。因为 CO₂ 的密度是温度和压力的函数, 温度升高, 体积膨胀、密度减小, 而压力升高, 体积被压缩、密度增大。

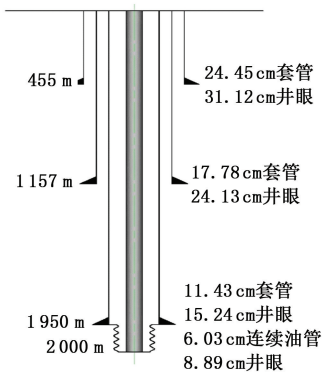


图2 SC-CO₂连续油管钻井井身结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of SC-CO₂ coiled tubing drilling

随着井深的增加,CO₂ 的温度和压力逐渐增大,其中自身温度上升对密度减小起主导作用。井底处,经钻头喷嘴节流后,CO₂ 被迅速压缩,密度增大。

4.1.2 黏度和摩阻系数

图4 为 CO₂ 的黏度和摩阻系数随井深的变化曲线。从图4 中可以看出,随着井深的增加,CO₂ 的黏度逐渐减小,钻杆和环空内的摩阻系数变化不大;接近井底处,受裸眼段粗糙度上升影响,摩阻系数突然增大。由于钻井过程中 CO₂ 流速大、密度大、黏度低, Re 通常在 1×10^5 以上,此时 Re 在一定范围内的变化对摩阻系数影响不大,摩阻系数的变化主要受水力直径和管壁粗糙度的影响。

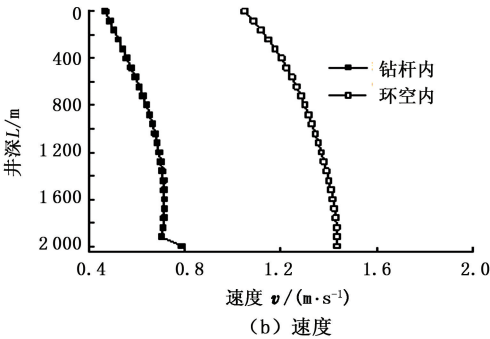
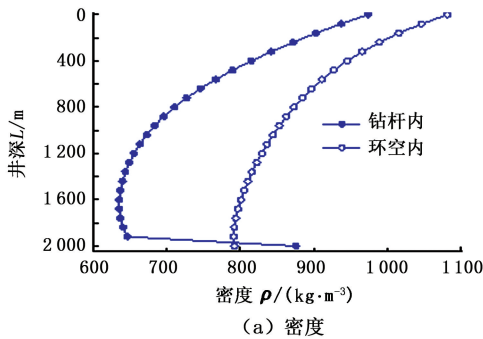


图3 CO₂ 的密度和流速随井深的变化

Fig.3 Variation of CO₂ density and flow velocity of SC-CO₂ drilling with depth

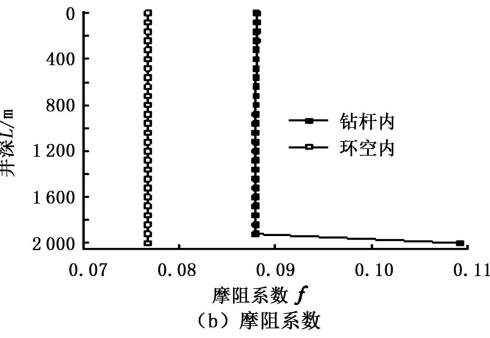
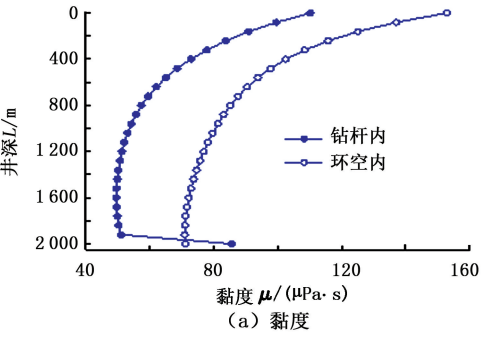


图4 CO₂ 的黏度和摩阻系数随井深的变化

Fig.4 Variation of CO₂ viscosity and friction factor of SC-CO₂ drilling with depth

4.1.3 比热容、导热系数和对流换热系数

图5 为 CO₂ 的比热容、导热系数和对流换热系数随井深的变化曲线。由图5 中可以看出,随着井深的增加,导热系数逐渐减小,比热容和对流换热系数先增大后减小,在井深约为 800 m 时达到最大值。比热容变化表示 CO₂ 的储热能力变化,而对流换热系数变化表示相同温差下 CO₂ 与周围地层之间的对流换热速率变化。随着井深增加,CO₂ 的储热能力和对流换热速率先增加后减小,而前者变化更快。

CO₂ 传热参数(即比热容和导热系数)的变化会对井筒内流体温度场产生一定的影响。

4.2 物性参数变化对 SC-CO₂ 钻井井筒内流动规律的影响

SC-CO₂ 钻井井筒内 CO₂ 的密度、黏度、比热容、导热系数等物性参数变化表明其压缩性、流变性、储热和导热能力等性质发生改变,必然对井筒内流体流动规律产生影响。为了分析井筒内 CO₂ 物性参数变化对其携岩能力、温度、压力等参数的影

响,分别对考虑(V)和忽略(C)CO₂物性变化时的井筒流体流动参数计算结果进行对比。若忽略钻井过程中流体物性的变化,则假设CO₂是一种物性恒定的理想流体,物性参数取其循环过程中的平均值:

密度为 799.7 kg/m³,比热容为 2 545.5 J/(kg · K),黏度为 75.2 μPa · s,导热系数为 0.091 5 W/(m · K)。

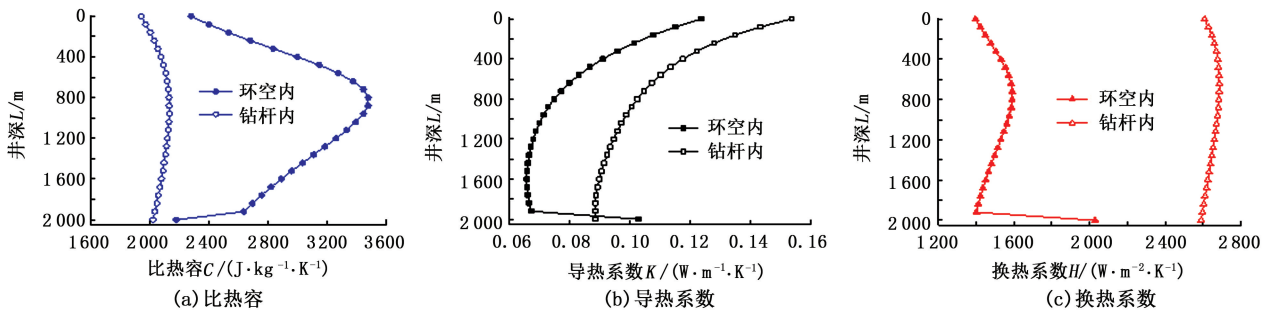


图 5 CO₂ 的比热容、导热系数和对流换热系数随井深的变化

Fig. 5 Variation of CO₂ specific heat capacity, thermal conductivity and heat transfer coefficient curves of SC-CO₂ drilling with depth

4. 2. 1 物性参数变化对携岩能力的影响

在气体钻井的环空携岩问题研究中,Angel 模型得到了广泛的应用。SC-CO₂ 喷射破岩时,形成的岩屑粒径比空气钻井时更小,最小动能准则同样适用于 SC-CO₂ 钻井^[25],因此应用最小动能准则计算 SC-CO₂ 钻井的最小携岩速度。

图 6 为 CO₂ 的流速和最小携岩速度随井深的变化曲线。由图 6 中可以看出,基于最小动能准则,若忽略 CO₂ 的物性变化,环空内各点的流体流速无法满足携岩要求。实际上,随着井深的增加,CO₂ 携岩能力逐渐增大,井深大于 740 m 时,就可以满足携岩要求。沿井深方向上,CO₂ 密度逐渐减小,流速和动能逐渐增大,导致其携岩能力增强。算例中,忽略 CO₂ 物性变化,最小携岩速度计算误差可达到 10.7%,井筒内 CO₂ 的物性参数变化对其携岩能力影响较大。

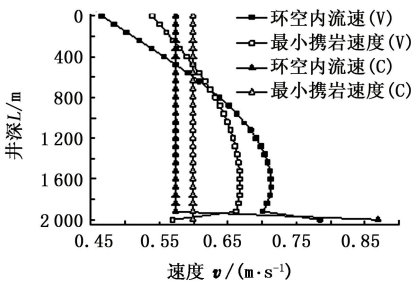


图 6 CO₂ 的流速和最小携岩速度随井深的变化

Fig. 6 Variation of flow velocity and minimum cuttings carrying velocity of CO₂ with depth

4. 2. 2 物性参数变化对压力场的影响

图 7 为 CO₂ 的压力随井深的变化曲线。由图 7

中可以看出,若不考虑其物性变化,钻具和环空内的 CO₂ 压力线性增大,井底处于过平衡状态。实际上,考虑其物性变化,CO₂ 压力变化呈非线性,井底处于欠平衡状态。因为 CO₂ 具有可压缩性,其密度沿井深连续变化,单位深度上静液柱压力和摩阻压降并不相同。要实现平衡钻井或近平衡钻井,须对压力场进行精细控制。算例中,忽略 CO₂ 物性变化,流体压力计算误差最大为 7.9%,表明 CO₂ 的物性参数变化对井底压力的计算具有一定的影响。

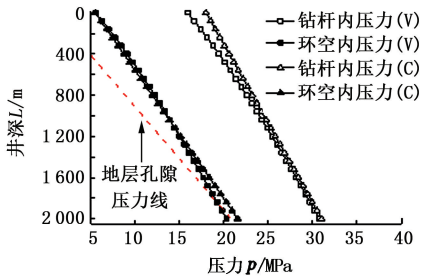
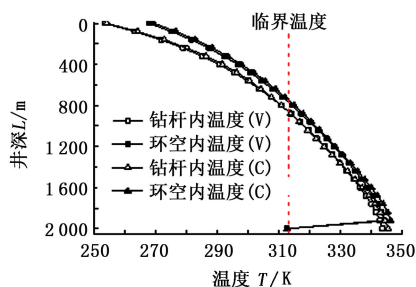


图 7 CO₂ 的压力随井深的变化曲线

Fig. 7 Variation of CO₂ pressure with depth

4. 2. 3 物性参数变化对温度场的影响

图 8 为 CO₂ 的温度随井深的变化曲线。由图 8 中可以看出,随着井深的增加,钻杆和环空内的温度逐渐增大,CO₂ 的相变点分别在 880 和 750 m 处。井筒内各点上考虑和忽略物性变化时 CO₂ 的温度并不相同,总体上两者间的差异随井深增加先减小后增大。忽略物性参数的变化会对井筒温度分布的计算产生一定的误差(算例中最大误差为 1.1%),主要与钻杆和环空内 CO₂ 比热容和对流换热系数的变化有关。

图8 CO₂ 的温度随井深的变化曲线Fig.8 Variation of CO₂ temperature with depth

5 结 论

(1) 优选出了适用于 SC-CO₂ 钻井井筒温度和压力条件下的 CO₂ 物性参数计算方法, 以比焓为研究对象, 建立了 SC-CO₂ 钻井井筒流体流动控制方程组, 分析了井筒内 CO₂ 物性参数变化对流动规律的影响。

(2) 在 SC-CO₂ 钻井井筒温度和压力条件下, Span-Wagner 方法和 V-W 方法的平均计算误差最小, 分别在 0.5% 和 1.5% 以内, 相对于其他计算方法精度更高。

(3) 随井深的增加, 钻具和环空中 CO₂ 密度、黏度、导热系数逐渐减小, 比热容先增大后减小; 受物性参数变化的影响, CO₂ 的流速和动能沿井深逐渐增大, 携岩能力逐渐增强, 压力变化沿井深呈非线性。

(4) 忽略密度、黏度、比热容、导热系数等物性参数的变化, 会导致对 CO₂ 携岩能力、井底压力和井筒温度分布的计算产生误差, 算例中各误差分别在 10.7%、7.9% 和 1.1% 以内。

参考文献:

[1] 杜玉昆, 王瑞和, 倪红坚, 等. 超临界二氧化碳射流破岩试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 93-96.
DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Rock-breaking experiment with supercritical carbon dioxide jet [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(4): 93-96.

[2] KOLLE J J. Coiled-tubing drilling with supercritical carbon dioxide[R]. SPE 65534, 2000.

[3] 李根生, 王海柱, 沈忠厚, 等. 超临界 CO₂ 射流在石油工程中应用研究与前景展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 76-80.
LI Gensheng, WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, et al.

Application investigations and prospects of supercritical carbon dioxide jet in petroleum engineering [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 76-80.

[4] 孙宝江, 张彦龙, 杜庆杰, 等. CO₂ 在页岩中的吸附解吸性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 95-99.
SUN Baojiang, ZHANG Yanlong, DU Qingjie, et al. Property evaluation of CO₂ adsorption and desorption on shale [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 95-99.

[5] ELSHARKAWY A M, HASHEM Y S K S, ALIKHAN A A. Compressibility factor for gas condensates [J]. Energy & Fuels, 2001, 15(4): 807-816.

[6] 廉黎明, 秦积舜, 刘同敬, 等. 修正混合规则的 BWRS 型状态方程及其在 CO₂-原油体系相态计算中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 81-88.
LIAN Liming, QIN Jishun, LIU Tongjing, et al. A BWRS type EOS based on modified mixing-rule and its application in phase behavior of CO₂-crude system [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(2): 81-88.

[7] SPAN R, WAGNER W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1996, 25(6): 1509-1596.

[8] 王海柱, 沈忠厚, 李根生, 等. CO₂ 气体物性参数精确计算方法研究[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(5): 65-67.
WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, LI Gensheng, et al. Research on the precise calculation method of physical parameters for CO₂ [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(5): 65-67.

[9] LEMMON E W, MCLINDEN M O, FRIEND D G. Thermophysical properties of fluid systems [DB]. NIST Chemistry Webbook, NIST Standard Reference Database, 2005, 69.

[10] BAHADORI A, VUTHALURU H. A simple method for prediction of transport properties of carbon dioxide [R]. SPE 122859, 2009.

[11] LEE A L, GONZALEZ M H, EAKIN B E. The viscosity of natural gases [J]. Journal of Petroleum Technology, 1966, 18(8): 997-1000.

[12] DEAN D E, STIEL L I. The viscosity of nonpolar gas mixtures at moderate and high pressures [J]. AIChE Journal, 1965, 11(3): 526-532.

[13] POLING B E, PRAUSNITZ J M, JOHNPAL O C, et

- al. The properties of gases and liquids [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [14] ROSENBAUM B M, THODOS G. Thermal conductivity of mixtures in the dense gaseous state: the methane—carbon dioxide system [J]. The Journal of Chemical Physics, 1969, 51(4):1361-1368.
- [15] SUTTON R P. Fundamental PVT calculations for associated and gas/condensate natural-gas systems [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, 10(3):270-284.
- [16] CHUNG T H, LEE L L, STARLING K E. Applications of kinetic gas theories and multiparameter correlation for prediction of dilute gas viscosity and thermal conductivity [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1984, 23(1):8-13.
- [17] CHUNG T H, AJLAN M, LEE L L, et al. Generalized multiparameter correlation for nonpolar and polar fluid transport properties [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1988, 27(4):671-679.
- [18] VESOVIC V, WAKEHAM W A, OLCHOWY G A, et al. The transport properties of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1990, 19(3):763-808.
- [19] FENGHOUR A, WAKEHAM W A, VESOVIC V. The viscosity of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1998, 27(1):31-44.
- [20] GUPTA A P, GUPTA A, LANGLINAIS J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation [R]. SPE 96992, 2005.
- [21] AL-ADWANI F A, LANGLINAIS J, HUGHES R G. Modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide [J]. SPE Drilling & Completion, 2009, 24(4):599-610.
- [22] KABIR C S, HASAN A R, KOUBA G E, et al. Determining circulating fluid temperature in drilling workover and well control operations[J]. SPE Drilling & Completion, 1996, 11(2):74-79.
- [23] WANG Z Y, SUN B J, WANG J T, et al. Experimental study on the friction coefficient of supercritical carbon dioxide in pipes [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 25:151-161.
- [24] 张勇,唐人选. CO₂ 井筒压力温度的分布[J]. 海洋石油, 2007, 27(2):59-64.
ZHANG Yong, TANG Renxuan. Study of distribution of wellbore pressure and temperature of CO₂ injection well [J]. Offshore Oil, 2007, 27(2):59-64.
- [25] 李良川,王在明,邱正松,等. 超临界二氧化碳钻井流体携岩特性实验[J]. 石油学报, 2011, 32(2):355-359.
LI Liangchuan, WANG Zaiming, QIU Zhengsong, et al. An experimental study on carrying cuttings features for supercritical carbon dioxide drilling fluid [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2):355-359.

(编辑 李志芬)