

超临界 CO₂ 钻井井筒流动规律

宋维强^{1,2}, 倪红坚², 景英华³, 王瑞和¹, 沈忠厚¹, 李 斌¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院, 山东青岛 266580;
3. 中国石油西部钻探工程有限公司, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:考虑井筒轴向传热以及井壁围岩的温度变化对流场的影响, 建立 CO₂ 井筒循环流动模型, 实现对流场压力参数、温度参数与 CO₂ 物性参数的耦合计算与分析。结果表明:实验条件下连续管内 CO₂ 由液态转变为超临界态的临界井深为 780 m, 环空中 CO₂ 可始终处于超临界态;环空中压力剖面与井深近似呈线性相关, CO₂ 的压降比水的小 36.7%;连续管内物性参数的变化主要由温度的变化决定, 环空中则取决于压力的变化;环空中雷诺数高达 10⁶, 处于较强的紊流状态;超临界 CO₂ 钻井在窄密度窗口储层应用中具有优势。

关键词:超临界 CO₂; 井筒流动; 传热; 压力剖面; 雷诺数

中图分类号:TE 242 **文献标志码:**A

引用格式:宋维强, 倪红坚, 景英华, 等. 超临界 CO₂ 钻井井筒流动规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(6):101-107.

SONG Weiqiang, NI Hongjian, JING Yinghua, et al. Study on wellbore flow field of supercritical carbon dioxide drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6):101-107.

Study on wellbore flow field of supercritical carbon dioxide drilling

SONG Weiqiang^{1,2}, NI Hongjian², JING Yinghua³, WANG Ruihe¹, SHEN Zhonghou¹, LI Bin¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Research Institute of Unconventional Petroleum and Renewable Energy in China University of Petroleum,
Qingdao 266580, China;
3. CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited (XDEC), Urumqi 830011, China)

Abstract: A wellbore circulation flow model was proposed to couple calculate and analyze the flow field pressure parameter, temperature parameter and physical parameter of CO₂, in consideration of the influence of the axial heat transfer and the temperature change of sidewall rocks on the flow field. The results show that CO₂ turns into supercritical state at the depth of 780 m in the tubing and it maintains the supercritical state in the annulus under experimental conditions. The pressure in the annulus is approximately in linear correlation with depth. The pressure change of CO₂ is 36.7% smaller than that of water. In the tubing, the temperature change dominates the changes of properties of CO₂. However, the pressure change becomes the dominating factor in the annulus. The Reynolds number is as high as 10⁶ in the annulus, which is in violent turbulence. The supercritical CO₂ drilling shows advantages in the exploitation of reservoirs with narrow pressure windows.

Keywords: supercritical CO₂; wellbore flow; heat transfer; pressure profile; Reynolds number

超临界二氧化碳钻完井技术与连续管钻完井技术相结合, 是一种动用非常规油气资源的有效技术

手段^[14]。研究人员采用数值模拟和室内试验的方法, 论证了以二氧化碳为循环介质进行破岩钻

收稿日期:2016-12-11

基金项目:国家“973”重大专项(2014CB239202); 国家博士后基金项目(2017m622315); 国家自然科学基金项目(51504281); 山东省自然科学基金项目(ZR201709190087)

作者简介:宋维强(1987-), 男, 博士, 研究方向为超临界二氧化碳钻完井基础理论。E-mail:westrong0808@s.upc.edu.cn。

通讯作者:倪红坚(1972-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为超临界二氧化碳钻完井和高效破岩方法与技术。E-mail:605368700@qq.com。

井^[5]、喷射压裂^[6]和驱替置换甲烷气^[7]等方面的技术优势;建立了 CO₂ 井筒流动传热模型,考察了相态分布规律及控制方法^[8-9];揭示了井斜角、井口回压等因素对携岩效率^[10-11]的影响规律。确定超临界 CO₂ 在井筒内的流动规律是优化水力参数设计、改善钻完井效果、实现欠平衡钻井并控、规避井下复杂工况(坍塌、漏失等)的主要依据。研究井筒流动规律的难点在于 CO₂ 的可压缩性及其对流动场的耦合影响^[8]。笔者通过改进现有模型,将其划分为压力输运和热量传导 2 个模块,并将基于 CO₂ 管流实验得到的摩阻系数引入到压力计算中。结合具体算例着重阐述井筒流场与物性参数的耦合机制,通过与水的对比定量说明超临界 CO₂ 钻完井技术在窄密度窗口储层的应用优势,并计算井筒内流速剖面和雷诺数。

1 流动模型的建立

1.1 几何模型

低温液态的 CO₂ 由连续管注入,在温差作用下与井壁围岩发生热交换,导致其密度、黏度、比定压热容和热导率等物理性质的变化,并进一步影响增压和传热,即呈耦合相关,被加热的 CO₂ 沿环空上返至地面。同时井壁围岩也与远离井筒的储层岩石进行热交换。为规避井下复杂,会在环空出口施加一定回压。流场几何模型及物理过程见图 1。

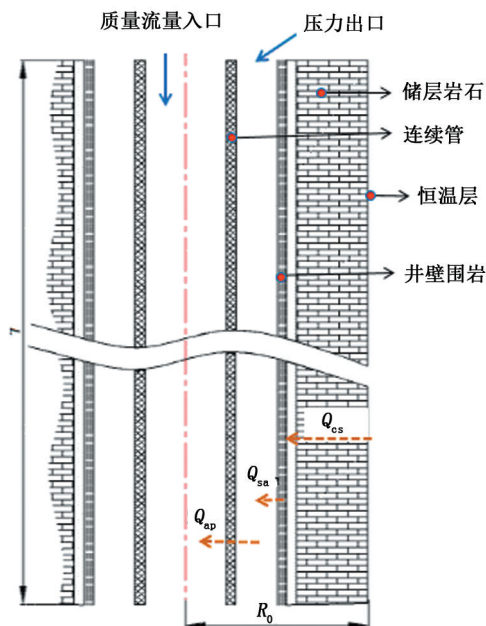


图 1 井筒流动物理模型示意图

Fig. 1 Geometry model of wellbore flow field

1.2 控制方程

基本假设:

- (1) 地温梯度为恒定值。
- (2) 忽略环空中固相对流场的影响。
- (3) 力图揭示稳定后的流场分布规律,不考虑时间因素。

欧拉方法是有限体积法中的一种,适用于描述可压缩流动,其控制方程组主要包括:连续性方程、动量方程和能量方程。钻完井条件下的低速流动需考虑重力影响,且定常流动中各瞬时相为零,简化后连续性方程为

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = 0. \quad (1)$$

动量方程与连续性方程联立可简化为

$$\text{div}(\rho v_i \vec{v}) - \rho \vec{v} \cdot \text{grad} v_i = 0. \quad (2)$$

稳态低速流动的能量方程可简化为

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial(\rho v_i h)}{\partial x_i} - \text{div}(k \text{grad} T) - S_h = 0. \quad (3)$$

式中,比焓 h 可取 $h = c_p T$; v_i 为速度 $\vec{v}$ 在直角坐标系 x_i 轴的分量; T 为温度, K; k 为传热系数, W/(m · K); c_p 为比定压热容, J/(kg · K); $S_h = \rho q$ 表示单位体积内辐射生热量, q 为单位质量流体内部辐射生热速率。

上述方程涉及 CO₂ 物性参数,且其在流场中会发生显著变化,因此需要引入状态方程进行精确计算。Span 和 Wagner 基于实测数据,拟合得到了计算密度和比定压热容的隐式方程^[12]:

$$\begin{cases} P(\delta, \tau) = \rho R T (1 + \delta \Phi_\delta^r), \\ \frac{Mc_p}{R} = -\tau^2 (\varphi_{\tau\tau}^o - \varphi_{\tau\tau}^r) + \frac{(1 + \delta \varphi_\delta^r - \delta \tau \varphi_{\delta\tau}^r)^2}{1 + 2\delta \varphi_\delta^r + \delta^2 \varphi_{\delta\delta}^r}. \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\delta = \rho/\rho_c$ 为无因次残余密度; $\tau = T_c/T$ 为无因次残余温度的倒数; Φ_δ^r 为亥姆霍兹自由能 $\Phi(\delta, \tau)$ 的偏导数, 无因次。

Vesovic 和 Wakeham^[13]建立了黏度和热导率的计算模型。在此基础上, Fenghour 和 Wakeham^[14]考虑温度对余量黏度的影响,得到了精度更高的黏度计算模型,二者以相似的形式给出:

$$\begin{cases} \eta(T, \rho) = \eta_0 + \Delta\eta(T, \rho) + \Delta\eta_c(T, \rho), \\ \lambda(T, \rho) = \lambda_0 + \Delta\lambda(T, \rho) + \Delta\lambda_c(T, \rho). \end{cases} \quad (5)$$

式中, η_0 为零密度黏度, Pa · s; $\Delta\eta$ 为余量黏度, Pa · s; $\Delta\eta_c$ 为奇异黏度, Pa · s; λ 为对应热导率。

通过与美国国家标准和技术研究院(NIST)公布的数据进行对比^[15],在钻完井涉及的温度压力条件下,采用上述数值计算结果代替实际值的误差为 0 ~ 0.3%。

为使控制方程组闭合可解,引入标准 $k-\varepsilon$ 方程计算可压缩流动的湍流^[16-17]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - (\mu + \mu_\tau) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \\ & \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon + Q_k, \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_\tau}{1.3} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \\ & 1.45 \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - 1.92 f_p \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + Q_\varepsilon. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

2 模型求解

有限体积法的基本思想是认为流场微元内的数据为恒定值,然后通过求解控制方程得到相邻单元的流场数据。如图 1 所示,径向传热过程可分为 3 部分,其中恒温层岩石与井壁围岩的传热量 Q_{cs} 计算式为

$$Q_{cs} = \frac{T_c - T_s}{\frac{1}{2\pi\lambda_s l} \ln \frac{r_c}{r_s}}. \quad (7)$$

式中, T_c 和 T_s 分别为恒温层岩石和井壁围岩温度, K; l 为微元轴向长度, m; r_c 和 r_s 分别为恒温层和井壁围岩半径, m。

井壁围岩与环空流体的传热 Q_{sa} 主要涉及两相
对流换热, 计算式为

$$Q_{sa} = \frac{T_s - T_a}{\frac{1}{2\pi \approx h_{rs} l}}. \quad (8)$$

式中, T_a 为环空中 CO_2 温度, K; h 为环空中 CO_2 与井壁围岩间的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

环空中 CO_2 与连续管内 CO_2 的传热涉及管体导热和对流换热, 计算式为

$$Q_{\text{ap}} = \frac{T_a - T_p}{\frac{1}{2\pi h r_i \hat{l}} + \frac{1}{2\pi \lambda_i l \ln \frac{r_o}{r_i}} + \frac{1}{2\pi \hat{h} r_o \hat{l}}}. \quad (9)$$

式中, T_p 为连续管内 CO_2 温度, K ; $\hat{h}$ 和 $\hat{\bar{h}}$ 分别为 CO_2 与管体内外壁面间的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; λ_1 为连续管导热率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; r_i 和 r_o 分别为连续管内、外半径, m 。

CO₂ 与管体在井眼轴向上的传热量可结合其热导率计算确定。流场单元内总传热量确定后,温度变化可由下式计算:

$$\Delta T = Q / c_p m . \quad (10)$$

在压力输运模块中,基于 Darcy-Weisbach 公式计算

沿程流动压耗为

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}. \quad (11)$$

其中, λ 为无因次摩阻系数; d 为流场当量直径, m; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 。

基于 Darcy-Weisbach 公式, Wang 等^[18]通过室内试验测试了 CO₂ 管流的摩阻系数,并将其拟合为雷诺数的函数。当雷诺数大于 3 400 时,计算式为

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.34 \lg \left(\frac{\varepsilon}{1.72d} - \frac{9.26}{Re} \lg \left(\left(\frac{\varepsilon}{29.36d} \right)^{0.95} + \left(\frac{18.35}{Re} \right)^{1.108} \right) \right). \quad (12)$$

显然,压力模块和温度模块通过对 CO_2 物性参数的影响耦合在一起,需要同时计算。

钻头喷嘴的压降和温降的计算式为

$$\left\{ \begin{aligned} m &= AP_2 \sqrt{\frac{2k}{R_s T_1 (k-1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \\ \Delta T_j &= - \int_{P_1}^{P_2} \mu_{JT} dP. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

结合工程实际,边界条件中给定流量、入口处流体温度和环空回压。初始化时将环空回压和入口温度赋予流场全部微元;利用状态方程计算得到入口微元内的 CO_2 物性参数,利用控制方程计算得到相邻微元内的温度和压力,以此类推完成第一次循环求解,得到全部流场数据;根据环空回压的计算值和设定值间的差值修正下次循环迭代时的入口压力,微元内的初始温度取上次循环的计算值;循环求解收敛后,得到流场全部微元的压力和温度,进而也得到了物性参数值和流速等数据。求解流程如图 2 所示。

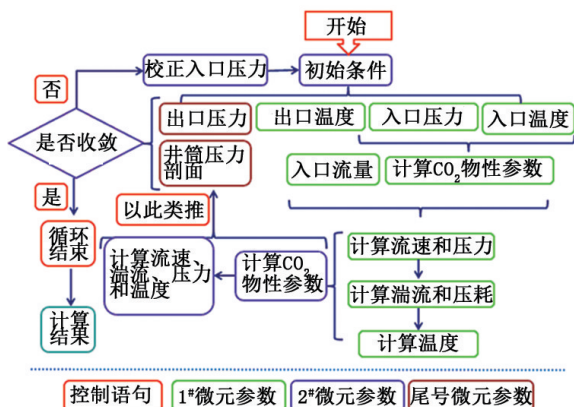


图2 井筒流动模型求解流程

Fig. 2 Flowchart for cycle calculation of wellbore flow model

3 算例分析

3.1 边界条件

综合考虑井眼清洗、环空控压等因素,质量流量取 25 kg/s , 入口处二氧化碳的温度取 253.15 K ; 将环空出口压力设置为 9 MPa 。模型求解所需的其他参数为: 地温梯度 0.028 K/m ; 岩石密度 2500 kg/m^3 ; 岩石比定压热容 $906 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; 岩石热导率 $3.283 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; 井眼半径 10.8 cm ; 连续管比定压热容 $871 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; 连续管内半径 5.43 cm ; 连续管外半径 6.35 cm ; 恒温层半径 54 cm ; 连续管密度 2719 kg/m^3 ; 连续管热导率 $202.4 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; 喷嘴半径 1 cm ; 喷嘴长度 2 cm ; 喷嘴距 4 cm ; 井深 1.5 km 。

3.2 压力剖面

为减少储层伤害, 规避井下复杂, 钻完井过程中需重点关注井下压力剖面。图3为循环介质分别为 CO_2 和 H_2O 时的压力剖面。

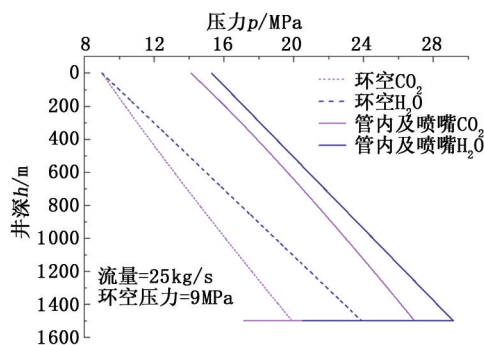


图3 二氧化碳与水井筒流动压力剖面对比

Fig. 3 Comparison of pressure curve between carbon dioxide and water well flow

从图3看出, 管内压力梯度呈递减趋势, 而环空中 CO_2 的压力剖面都与井深近似呈线性相关, 这与之前的研究结果相符^[8,19]。通过与水的压力剖面对比发现, 在相同环空回压(9 MPa)条件下, 水的压力剖面始终高于 CO_2 的压力剖面, 其中环空中 CO_2 的压降(10.9 MPa)比水的(14.9 MPa)小 36.7% , 证实了超临界 CO_2 钻井技术在非常规油气藏、老油藏等窄密度窗口储层的应用优势。 CO_2 流经钻头喷嘴时的压降为 9.78 MPa , 继续沿喷嘴轴线到达井底岩石表面过程中压力又增大 4.03 MPa , 这一过程体现了动能与压能的相互转化。此外, 由于连续管轴线与环空中心线相距 8.575 cm , 因此压力剖面在井底处是间断的。

前已述及, 井下压力剖面与密度剖面(图4)和

黏度剖面(图5)耦合相关。在连续管的上部井段, CO_2 的密度值较大, 有利于压力的快速增大; 但同时其黏度值也较大, 对压力的增长起阻碍作用; 最终, 虽然连续管内密度和黏度随井深显著变化, 但压力梯度在浅层和深层相差不大。在井底区域, 二氧化碳的密度仍然较高, 足以驱动井下动力钻具, 是超临界二氧化碳钻井技术可行的佐证之一^[3]。钻头喷嘴内, CO_2 的密度比水的小 $16.7\% \sim 20.1\%$, 导致其喷嘴压降比水的大 11.7% 。二氧化碳沿环空上返过程中, 其密度在上部井段下降略快, 而黏度与井深近似呈线性相关。

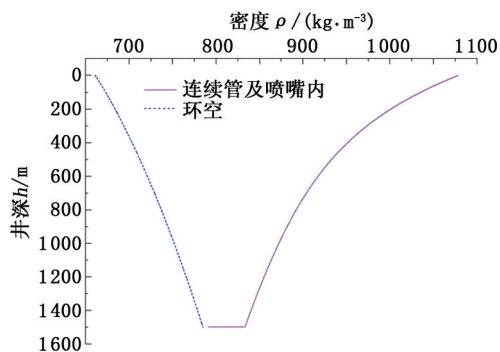


图4 井下密度剖面

Fig. 4 Density profile in well bore

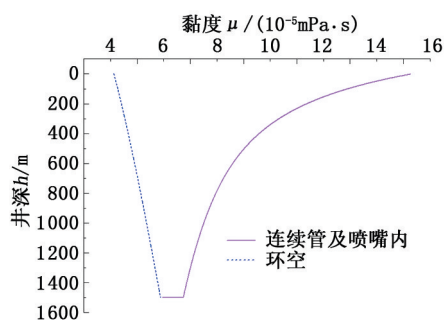


图5 井下黏度剖面

Fig. 5 Viscosity profile in well bore

根据 Span-Wagner 模型^[12]和 Fenchour-Wakeham 模型^[13], CO_2 的密度和黏度与压力呈正相关, 即应与井深呈正相关(图3); 但连续管内并不符合上述规律, 原因是流体温度增长较快(图6), 成为决定密度和黏度变化的主因。

3.3 温度剖面

从井下温度剖面图(图6)看出, 液态 CO_2 进入连续管后在较大温差作用下迅速升温。本例条件下, 在井深为 780 m 处温度升至 304.2 K 而进入超临界态, 临界井深大于之前的研究结果^[8], 主要原因是考虑了井壁围岩的温变和轴向传热, 显然这与实际工况更为相符。钻头喷嘴温降为 11.7 K , CO_2

从喷嘴出口流向井底岩石表面时,温度又有升高,反应了动能向内能转化。CO₂ 沿环空上返时,降温趋势逐渐加强;但通过提高出口回压,可使环空中 CO₂ 始终处于超临界态,进而有利于提高破岩效率和油气采收率^[3-5]。由于 CO₂ 密度和黏度与温度呈负相关关系^[12-13],综合图 3~6 可知,连续管内的温度变化主导了 CO₂ 密度和黏度的变化,而环空中的压力变化成为 CO₂ 物性参数变化的主导因素。

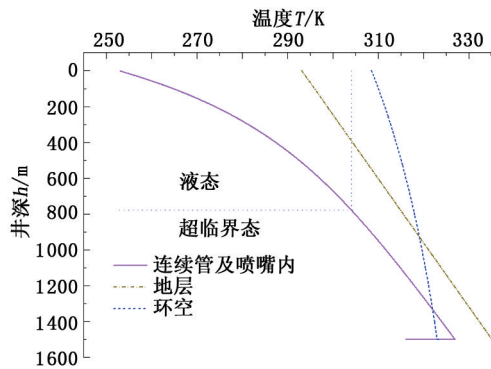


图 6 井下温度剖面

Fig. 6 Temperature profile in well bore

除了与井壁围岩的温差之外,CO₂ 的热导率(图 7)和比定压热容(图 8)也会显著影响井下温度剖面。由图 7 看出,连续管内 CO₂ 热导率随井深增大而减小,即浅层的热交换更为剧烈,同时连续管内比定压热容又较小(图 8),有利于增大浅层连续管内的温度变化,这与连续管内实际温度剖面(图 6)的变化规律相符。环空中,二氧化碳热导率与井深近似呈正相关,原因是压力变化主导了热导率的变化。

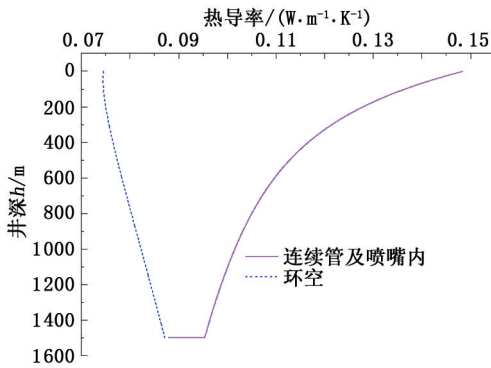


图 7 井下热导率剖面

Fig. 7 Thermal conductivity profile in well bore

算例所涉及的温度和压力范围内,CO₂ 比定压热容与温度呈正相关,而与压力呈负相关。从图 8 看出,浅层连续管内由于温度变化较为剧烈,比定压热容呈增大趋势;深层连续管内压力变化的影响作用增强,比定压热容又呈减小趋势;但总体上比定压

热容变化甚微。环空中,比定压热容的变化完全由压力的变化主导,其随 CO₂ 上返而逐渐增大,而且增速逐渐加快。当温度为 323.15 K,压力为 25 MPa 时(接近井底处的温度和压力环境),CO₂ 的比定压热容为 2.30×10^3 kJ/(kg·K),是空气比定压热容(1.26×10^3 kJ/(kg·K))的 1.83 倍;当温度为 308.15 K,压力为 10 MPa 时(接近环空出口处的温度和压力环境),CO₂ 的比定压热容为 5.63×10^3 kJ/(kg·K),是空气比定压热容(1.16×10^3 kJ/(kg·K))的 4.85 倍,甚至大于水的比定压热容(4.15×10^3 kJ/(kg·K))。由于 CO₂ 比定压热容较大,因此井底附近环空中温度比连续管内的温度低;浅层环空中 CO₂ 温度高于储层岩石温度。

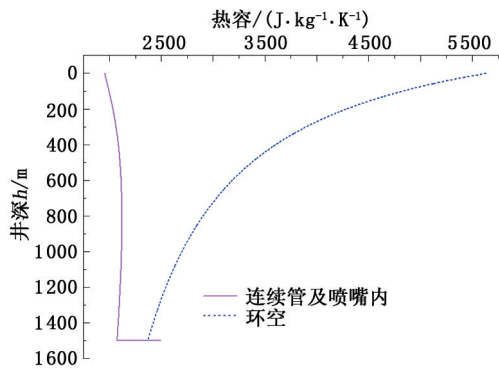


图 8 井下比定压热容剖面

Fig. 8 Heat capacity profile in well bore

3.4 流速剖面

流速剖面与密度剖面和黏度剖面相结合,可判定井下工况是否满足井眼清洗的需求^[20]。井下流速剖面见图 9。可以看出,连续管内流速逐渐增大,而沿环空上返时流速逐渐增大;在携岩方面,在密度值和黏度值较小的井段,CO₂ 流速相应地有所增大,有利于保持相对稳定的携岩效果。

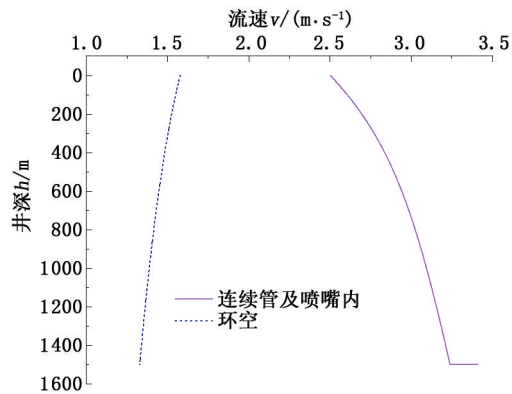


图 9 井下流速剖面

Fig. 9 Flow rate profile in well bore

雷诺数与流速高度相关,反映黏性力对压力项的影响,可据此判定流动状态。井下雷诺数剖面见图1。可以看出,CO₂井筒流动时的雷诺数高达10⁶,处于较强的紊流状态,说明压力项与黏性力(如流动摩阻)的相关性较小而主要取决于惯性力(重力),因此压力剖面的变化趋势(图3)主要取决于密度剖面(图4)。此外,较高的雷诺数和较低的黏度说明固体壁面对流动的影响较弱。

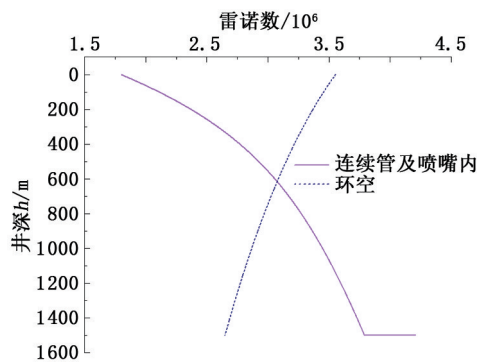


图10 井下雷诺数剖面

Fig.10 Reynolds number profile in well bore

4 结 论

(1)环空压力与井深近似呈线性相关,CO₂在环空中的压降比水的小36.7%;连续管内CO₂的增温趋势逐渐减缓,在井深780m处进入超临界态;环空中CO₂可始终处于超临界态。

(2)CO₂的物性参数与温度剖面和压力剖面耦合相关;连续管内物性参数的变化取决于温度的变化,而在环空中则取决于压力的变化;井底CO₂的密度足以驱动动力钻具;井下CO₂的比定压热容远大于空气比定压热容,环空出口附近大于水的比定压热容;CO₂井筒流动时的雷诺数高达10⁶,处于较强的紊流状态,固体壁面对流动的影响较弱。

(3)超临界CO₂钻井技术在窄密度窗口地层的应用中具有优势。

参考文献:

[1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2013,33(2):173-187.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and un conventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,33(2):173-187.

[2] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(2):129-136.

[3] 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.

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

[5] 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.

[6] 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.
CHENG Yuxiong, LI Gensheng, WANG Haizhu, et al. Pressure boost mechanism within cavity of the supercritical CO₂ jet fracturing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(3):550-555.

[7] 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.

[8] 王瑞和,倪红坚.二氧化碳连续管井筒流动传热规律研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):65-70.
WANG Ruihe, NI Hongjian. Wellbore heat transfer law of carbon dioxide coiled tubing drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(5):65-70.

[9] 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.

[10] 沈忠厚,王海柱,李根生.超临界CO₂钻井水平井段携岩能力数值模拟[J].石油勘探与开发,2011,38(2):233-236.
SHEN Zhonghou, WANG Haizhu, LI Gensheng. Nu-

metical simulation of the cutting-carrying ability of supercritical carbon dioxide drilling at horizontal section [J]. Petroleum Exploration and Develepment, 2011,38 (2):233-236.

[11] SONG W Q, WANG R H, NI H J, et al. Multiphase flow mechanism of sand cleanout with supercritical carbon dioxide in a deviated wellbore[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015,25:140-147.

[12] SPAN R, WAGNER W. A new equation of state for CO₂ covering the fluid region from the triple-point temperature to 1 100 K at pressure up to 800 MPa[J]. J Phys Chem Ref Data, 1996,25(6):1509-1596.

[13] VESOVIC A, WAKEHAM W A. The transport properties of carbon dioxide[J]. J Phys Chem Ref Data, 1990,19(3):763-808.

[14] FENGHOUR A, WAKEHAM W A. The viscosity of carbon dioxide[J]. J Phys Chem Ref Data, 1998,27 (1):31-44.

[15] National Institute of Standards and Technology. NIST standard reference data [DB/OL]. [2016-12-15]. www.webbook.nist.gov/chemistry/, 2011.

[16] 高学平. 高等流体力学[M]. 天津:天津大学出版社, 2005:16-28.

[17] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004:122-126.

[18] 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.

[19] WANG Z Y, SUN B J, SUN X H, et al. Phase transitions during supercritical carbon dioxide drilling [J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2015(5): 1-11.

[20] DOAN Q T, OGUZTORELI M, YONEZAWA T, et al. Modeling of transient cuttings transport in underbalanced drilling (UBD) [R]. SPE 85061, 2003.

(编辑 刘为清)