

# 超临界二氧化碳钻井时井底压力研究

丁璐, 倪红坚\*, 王瑞和, 杜玉昆, 王勇

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛, 266580, Email: nihj@upc.edu.cn)

**摘要:** 利用超临界二氧化碳开发油气藏资源极具潜力, 不过许多基础问题仍有待研究, 井底波动压力变化问题则是其中之一。基于超临界二氧化碳的物性, 建立了物性控制方程、流动控制方程、瞬态控制方程, 最终获得井底的热流固耦合瞬态波动压力模型。在关泵条件下, 起下钻速度越大, 井底波动压力越大。当起下钻速度为 0.1 ~ 2.0m/s 时, 最大激动压力从 0.13 MPa 升到 3.86 MPa, 产生的最大抽汲压力从 0.13 MPa 升到 1.83 MPa。与清水钻井对比发现, 超临界二氧化碳钻井产生的波动压力偏低, 有利于现场作业, 可以适当加快起下钻速度, 提高工作效率。

**关键词:** 超临界二氧化碳; 起下钻; 波动压力; 瞬态; 井底压力

## 1 引言

探索新技术用油气资源开发是学者们一直研究的方向, 使用超临界二氧化碳钻完井的潜力巨大<sup>[1-3]</sup>, 已经逐渐成为共识。目前的研究主要集中在超临界二氧化碳钻井的井筒流动规律、携岩规律以及井壁稳定性<sup>[4-8]</sup>, 而在实际工况中, 经常会碰到意外情况, 需要关泵, 并且进行起下钻作业, 所以相应的瞬态井底波动压力规律急需研究, 以保证在安全的情况下, 快速起下钻, 避免钻井事故的发生。Gjerstad, Tang, He 等<sup>[9-13]</sup>研究了不同流体在起下钻过程中引发的波动压力。Togun 等<sup>[14]</sup>额外考虑了传热与湍流两个因素, 结果更加接近实际流动情况。本研究在此基础上, 建立瞬态分析法, 模拟起下钻的运动过程, 揭示井底压力随时间变化的规律。

通过上述调研与研究, 本研究基于二氧化碳物性建立了井底可压缩流体物性控制方程组、流动控制方程、瞬态控制方程。在考虑了流体与井壁围岩、钻柱传热的条件下, 确定了超临界二氧化碳钻井起下钻时的瞬态热流固耦合波动压力模型, 并试图分析在关泵条件下的井底压力规律, 对以后的现场作业具有指导意义。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(18CX02072A); 中国石油大学(华东)自主创新科研计划项目(理工科)

18CX06032A

## 2 模型的建立

### 2.1 几何模型

由于研究对象是井底压力，为简便计算，进行局部模拟，模型设置在井底 10 m 处，钻柱停在井底，X 轴为井眼轴线，具体剖面示意图见图 1(单位：mm)。

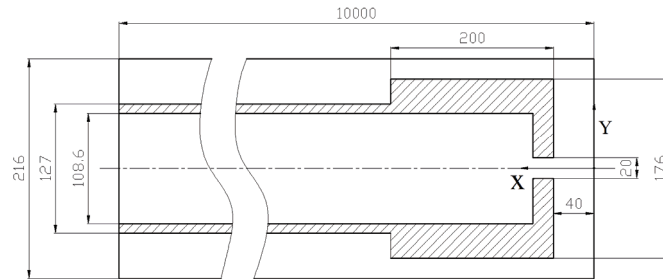


图 1 模型剖面示意图

### 2.2 控制方程组

#### 2.2.1 物性控制方程

采用美国国家标准与技术研究所(NIST)建议的方程来描述流体的物性变化。这些方程已被证明可以精确地描述二氧化碳的物性变化。

密度与温度、压力关系的隐式方程如下所示：

$$P(\delta, \tau) = \rho RT (1 + \delta \phi'_\delta) \quad (1)$$

式中： $\delta$  为密度与临界密度的比值，无量纲； $\tau$  为临界温度与温度的比值，无量纲； $R$  为气体常数，无量纲； $\phi'_\delta$  为亥姆霍兹自由能  $\phi(\delta, \tau)$  的偏导数，无量纲。

#### 2.2.2 流动控制方程

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_3)}{\partial x_3} = S_m \quad (2)$$

式中： $\rho$  为流体的密度， $\text{kg/m}^3$ ； $t$  为流动时间， $\text{s}$ ； $x_1, x_2, x_3$  为三坐标系 3 个方向的坐标距离， $\text{m}$ ； $u_1, u_2, u_3$  为沿三坐标系三个方向的速度， $\text{m/s}$ ； $S_m$  为由离散相引起的连续相质量的增加， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right] \quad (4)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & (i = j) \\ 1 & (i \neq j) \end{cases}$$

式中： $P$  为流体的压力，MPa； $\tau_{ij}$  为应力张量，MPa； $\rho g_i$  为重力引起的体积力， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^3)$ ； $\mu$  为分子黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $\delta_{ij}$  为克罗内克符号。

### 2.2.3 瞬态控制方程

设定时间步长为 0.001s，运动时间为 1s。每当钻柱上升或者下降的运动距离达到一空间步长 0.001m 时，钻柱会增加或减少一个节点，控制方程为：

$$\text{floor} \left( \frac{\sum_{j=1}^m \Delta t u(t)}{\Delta x} \right) = n(t) \quad (5)$$

式中： $\Delta t$  为时间步长，s； $\Delta x$  为空间步长，m； $u(t)$  为钻柱速度，m/s； $n(t)$  为钻头处空间节点数，无量纲。

## 3 算例分析

### 3.1 边界条件

结合工程实际与文献研究，模拟一口 1500 m 深的直井，使用连续管进行超临界二氧化碳钻井。将连续管入口边界属性设置为质量流量入口，并赋值 25 kg/s，给定地面入口处二氧化碳的温度为 253 K；将地面环空出口边界属性设置为压力出口，并赋值 9 MPa。流体与钻柱壁面设为热耦合边界，流体与井壁设为热对流边界。地温梯度 0.028 K/m，岩石密度 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，岩石热容，906 J/(kg·K)，岩石热导率 3.283 W/(m·K)，井壁围岩对流换热系数 500 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )，连续管对流换热系数 500 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )，连续管热导率 202.4 W/(m·K)。

### 3.2 瞬态波动压力分析

在关泵条件下，初始井筒流体流速为零。钻柱的运动过程分为以下几步：

- (1) 钻柱停在井底，设置井筒流体流速为零。

(2) 钻柱分别以 0.1m/s、0.4m/s、0.7m/s、1.0m/s、2.0m/s 的恒定速度上升 1s，时间步长为 0.001s，共 1000 步。

(3) 钻柱停止后，设置井筒流体流速为零。

(4) 钻柱分别以 0.1m/s、0.4m/s、0.7m/s、1.0m/s、2.0m/s 的恒定速度下降 1s，时间步长为 0.001s，共 1000 步，此刻回到井底。

计算得到钻柱上升时，不同速度条件下的井底压力变化如图 2 (a) 所示。井底压力因为钻柱的上升而逐渐下降。

当钻柱上升时，井底产生抽汲压力，压力迅速降低。由于超临界具有压缩性，在上升初期可明显观察到井底压力的波动。从整体上看，上升速度越快，降低越明显。当起钻速度在 0.1~2.0m/s 时，最大抽汲压力从 0.13MPa 升到 1.83MPa。

计算得到钻柱下降时，不同速度条件下的井底压力变化如图 2 (b) 所示。井底压力因为钻柱的下降而逐渐上升。

当钻柱下降时，井底产生激动压力，压力迅速升高。由于超临界具有压缩性，在钻柱下降初期可明显观察到井底压力的波动。从整体上看，下降速度越快，压力上升的越明显。当下钻速度在 0.1~2.0m/s 时，最大激动压力从 0.13MPa 升到 3.86MPa。

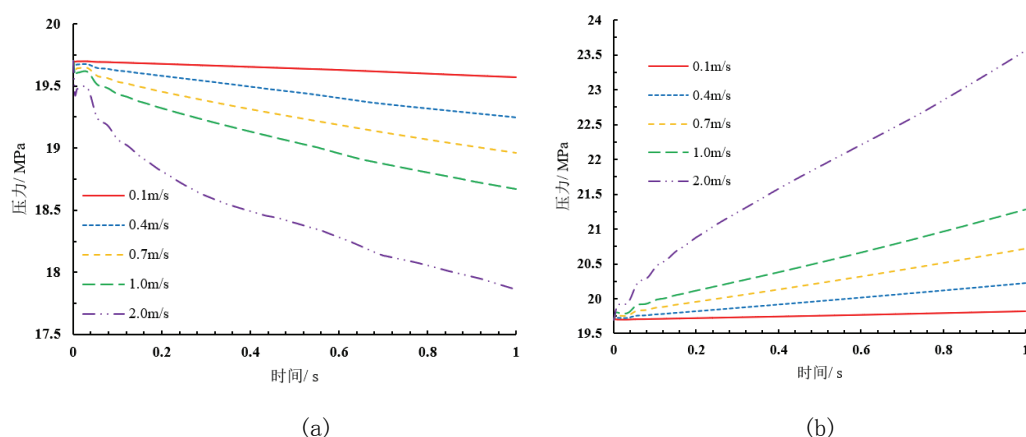


图 2 钻柱上升 (a)、下降 (b) 时井底压力变化

### 3.3 与清水钻井的对比分析

通过与清水钻井时波动压力剖面对比，分析超临界二氧化碳钻井时波动压力的特征。在相同条件下，起下钻速度设置为 1.0m/s，超临界二氧化碳和清水钻井时的井底压力剖面如图 3 所示。

清水钻井时，钻柱的上升引起井底压力下降；钻柱的下降引起井底压力上升，波动压力规律与超临界二氧化碳相似。不同的是，井底附近的超临界二氧化碳密度约为  $800\text{kg/m}^3$ ，小于清水密度，流向井底时，其井底压力值偏低。从图 3 中可以看出，超临界二氧化碳钻

井时的井底压力值一直低于清水时的井底压力值。

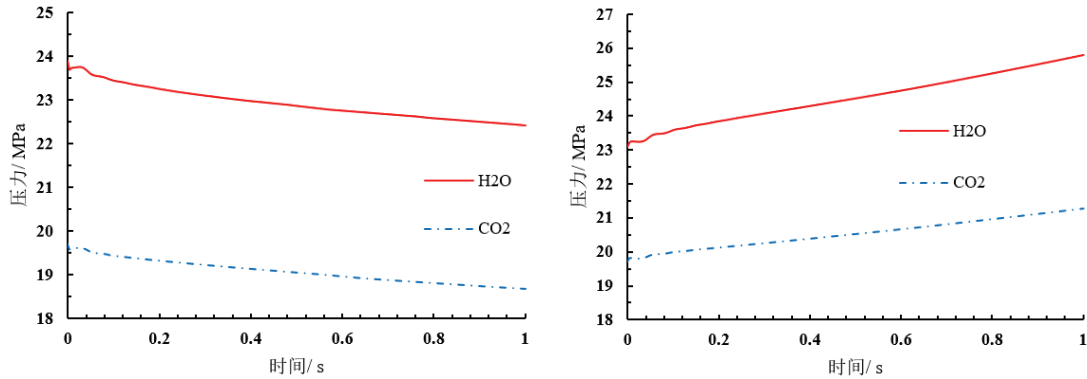


图3 钻柱上升（左）、下降（右）时井底压力变化对比

相比于清水，超临界二氧化碳密度较低，所产生的压力波动偏低。而且超临界二氧化碳是可压缩流体，对波动压力的传递效果较低，导致压力波动偏低。通过表 1 对比分析证明，超临界二氧化碳钻井时产生的最大激动压力与最大抽汲压力低于清水，有利于加快起下钻速度，提高工作效率，有效避免钻井事故的发生。此结论与文献结论<sup>[15]</sup>一致：钻井液密度越高，井底波动压力越大。

表 1 波动压力数据对比

钻井液	超临界二氧化碳	清水
最大激动压力	1.58 MPa	2.71MPa
最大抽汲压力	1.03 MPa	1.48 MPa

## 4 结论

利用瞬态热流固耦合波动压力模型分析了 1500m 直井的稳态流场，获得了井底 10m 处超临界二氧化碳的流动规律。

(1) 当钻柱上升时，会产生抽汲压力。上升速度越大，产生的抽汲压力越大，速度在 0.1 ~ 2.0 m/s 范围内时，最大抽汲压力从 0.13MPa 升高到 1.83MPa。当钻柱下降时，会产生激动压力。下降速度越大，产生的激动压力越大，速度在 0.1 ~ 2.0 m/s 范围内时，最大激动压力从 0.13MPa 升高到 3.86MPa。

(2) 与清水钻井对比发现，超临界二氧化碳钻井产生的波动压力偏低，可以适当加

快起下钻速度,提高工作效率,有效避免钻井事故的发生,证明了超临界二氧化碳钻井的优势,为超临界二氧化碳在钻井和完井中的应用奠定了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Gupta A.P, Gupta A., Langlinais J.. Feasibility of Supercritical Carbon Dioxide as a Drilling Fluid for Deep Underbalanced Drilling Operation[C]. 2005, SPE 96992.
- 2 Middleton R.S., Carey J.W., Currier R.P., et al. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO<sub>2</sub>[J]. Applied Energy, 2015, 147(3): 500-509.
- 3 王瑞和, 倪红坚, 宋维强, 等. 超临界二氧化碳钻井基础研究进展[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(02): 1-9
- 4 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.
- 5 宋维强, 王瑞和, 倪红坚, 等. 水平井油气水侵对超临界 CO<sub>2</sub> 携岩的影响[A]. 中国力学学会、《水动力学研究与进展》编委会、中国造船工程学会、中国石油大学(华东). 第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集--E 工业流体力学[C]. 中国力学学会、《水动力学研究与进展》编委会、中国造船工程学会、中国石油大学(华东): 上海《水动力学研究与进展》杂志社, 2014: 7.
- 6 Song W.Q., Ni H.J., Wang R.H., et al. Wellbore flow field of coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide[J]. Greenhouse Gases Science & Technology. 2017, 7(4): 1-11.
- 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 Ding L., Ni H., Li M., et al. Wellbore collapse pressure analysis under supercritical carbon dioxide drilling condition [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2018, 161: 458-467.
- 9 Gjerstad K., Time R.W., Bjørkevold K.S.. Simplified explicit flow equations for Bingham plastics in Couette-Poiseuille Flow-For dynamic surge and swab modeling[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2012, 175: 55-63.
- 10 Gjerstad K., Time R.W.. Simplified explicit flow equations for Herschel-Bulkley fluids in Couette-Poiseuille Flow-For real-time surge and swab modeling in drilling[C]. 2015, SPE 170246.
- 11 Tang M., Xiong J.Y., He S.M.. A new model for computing surge/swab pressure in horizontal wells and analysis of influencing factors[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 19: 337-343.
- 12 He S.M., Tang M., Wang W., et al. Numerical model for predicting the surge and swab pressures for yield-power-law fluids in an eccentric annulus[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 28-34.
- 13 He S.M., Srivastav R., Tang M., et al. A new simplified surge and swab pressure model for

- yield-power-law drilling fluids[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 28: 184-192.
- 14 Togun H., Shkarah A.J., Kazi S., et al. CFD simulation of heat transfer and turbulent fluid flow over a double forward-facing step[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 1-10.
- 15 吴鹏程, 徐朝阳, 孟英峰, 等. 窄安全密度窗口地层钻井起下钻井底压力瞬态波动规律[J]. 钻采工艺, 2016, 39(4): 22-25.

## Bottom hole pressure analysis of supercritical carbon dioxide drilling

DING Lu, NI Hong-jian<sup>\*</sup>, WANG Rui-he, DU Yu-kun, WANG Yong

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, P. R. China

Email: nihj@upc.edu.cn)

**Abstract:** There is great potential to develop oil and gas reservoirs by using supercritical carbon dioxide drilling. But many basic theoretical problems remain to be studied, such as the transient bottom hole pressure under supercritical carbon dioxide drilling condition. Based on the physical property of supercritical carbon dioxide, the physical property control equation, wellbore flow control equation and transient control equation have been established, then the heat-fluid-solid coupling transient surge and swab pressure model in bottom hole has been established. Under stopping the pump condition, the larger the trip speed, the greater the fluctuation range. When the trip speed is 0.1 ~ 2.0m/s, the maximum surge pressure increases from 0.13 MPa to 3.86MPa, and the maximum swab pressure increases from 0.13 MPa to 1.83 MPa. Compared with water drilling, it is found that surge and swab pressure of supercritical carbon dioxide drilling is low, which is conducive to the field operation, and can appropriately accelerate the drilling speed and improve the work efficiency.

**Key words:** supercritical carbon dioxide; trip in and out; surge and swab pressure; transient; bottom hole pressure